



Análise da Qualidade de Energia por Recurso a Análise Gramatical

Por:

Tiago Daniel Ribeiro da Fonseca

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri:

Orientador: Prof. João Francisco Alves Martins (FCT-UNL)

Co-Orientador: Mestre Pedro Miguel Ribeiro Pereira (FCT-UNL)

Presidente: Prof. Mário Ventim Neves (FCT-UNL)

Arguente: Prof. António Dente (IST)

Lisboa

2011

Análise da Qualidade de Energia por Recurso a Análise Gramatical

Copyright © Tiago Daniel Ribeiro da Fonseca, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

Agradecimentos

Aos meus professores, amigos e colegas que contribuíram para a minha formação ao longo dos últimos anos.

Agradeço ao meu orientador, Professor João Martins, pela oportunidade de realização deste trabalho e ajuda em todo o seu processo, a constante confiança que me foi dada, necessária em vários momentos mais difíceis.

Ao meu co-orientador, Mestre Pedro Pereira, todos os momentos de boa disposição e à vontade proporcionados, tornando toda a minha experiência mais profícua.

Agradeço aos meus colegas de curso, “núcleo duro”, todo o convívio e amizade, resultando numa vivência de curso mais enriquecedora.

Um agradecimento ao Professor Daniel Foito, do Instituto Politécnico de Setúbal, pela ajuda prestada na aquisição de dados reais, sem estes, esta dissertação não estaria completa.

Finalmente agradeço à minha família, nomeadamente à minha mãe, que me educou e guiou em todos os momentos, dando-me sempre o seu apoio incondicional.

Sumário

O crescente uso de sistemas não-lineares em áreas domésticas e industriais, gera fenómenos indesejáveis na rede de fornecimento eléctrico, que, por sua vez, afectam outros sistemas ligados à mesma. A presente dissertação incide no estudo e elaboração de bases para um método de detecção e classificação automática de perturbações na rede eléctrica (trifásica), recorrendo à área matemática de linguagens formais. É feita uma transformação do sinal e analisada no espaço de tensões, ao contrário da grande maioria dos métodos actuais, que trabalham no domínio do tempo-frequência; procede-se à aprendizagem automática das diferentes perturbações, aplicando-se os resultados obtidos na detecção de novas perturbações.

Palavras-chave:

Qualidade de energia, linguagens formais, inferência gramatical, reconhecimento de padrões.

Abstract

Due to the growth of electronic loads connected to the power network, the occurrence of electrical disturbances in the network has increased, affecting the normal behavior of equipment. Therefore, this is an investigative dissertation focusing on a new method of automatic detection and classification in power quality disturbances through a 3-phase system, using the mathematical tool of formal languages theory. Data is created for the learning process, where different results are retrieved using a grammatical inference and transformations, then applied in the detection and classification of new events.

Keywords:

Power quality, formal languages, grammatical inference, pattern recognition.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e motivação	1
1.2	Revisão bibliográfica	1
2	Qualidade de energia	9
3	Linguagens Formais e Inferência Gramatical	15
3.1	Linguagens formais - gramáticas	15
3.2	Inferência gramatical	16
3.2.1	Inferência e DFA/NFA	18
3.2.2	Expressão regular	19
3.2.3	Aprendizagem	21
3.2.3.1	Obtenção da amostra (palavra)	22
3.2.3.2	Inferir a gramática	23
4	Inferência gramatical de eventos da qualidade de energia	27
4.1	Perturbações de um sistema trifásico: sinal e aquisição da amostra	28
4.1.1	Distorção harmónica	28
4.1.2	Flutuações de tensão	31
4.1.3	Interrupção	33
4.1.4	Cava de tensão	35
4.1.5	Sobretensão	36
4.1.6	Desequilíbrio de tensões	37
4.2	Processamento do sinal	41
4.2.1	Transformada de Concordia e comparação com situação normal	41
4.2.2	Discretização Alfabética	41
4.3	Inferência	42
5	Resultados	45
5.1	Inferência gramatical a partir de dados simulados	45
5.1.1	Distorção Harmónica	45
5.1.2	Flutuações de Tensão	47
5.1.3	Interrupção	48
5.1.4	Cava de tensão	50
5.1.5	Sobretensão	51
5.1.6	Desequilíbrio de tensões	53
5.2	Reorganização do alfabeto	57
5.3	Análise da qualidade de energia	62

5.3.1	Algoritmo para identificação de uma perturbação	62
5.3.2	Aplicação a resultados experimentais	65
5.3.2.1	Interrupção	66
5.3.2.2	Cava de Tensão	67
5.3.2.3	Sobretensão	68
5.3.2.4	Flutuações de Tensão	70
6	Conclusões	73
	Bibliografia	77

Lista de Figuras

1.1	Detecção de eventos na forma de onda [2]	2
1.2	Amplitudes fundamentais e índices de detecção [2]	2
1.3	Diagrama do método proposto em [4]	3
1.4	Resultados de u_{MORPH} [4]	4
1.5	Diagrama do método de [5]	4
1.6	Resultados obtidos numa situação de sobretensão transitória [5]	5
1.7	STFT vs Wavelet[10]	6
1.8	Medição da perturbação na onda[12]	6
1.9	Medições obtidas na situação de interrupção[12]	7
2.1	Forma de onda de uma cava de tensão [17]	9
2.2	Valor eficaz de uma perturbação tipo cava de tensão [17]	10
2.3	Forma de onda de uma sobretensão[17]	10
2.4	Valores eficazes de um sistema trifásico aquando da ocorrência de uma interrupção breve e respectiva recuperação[17]	11
2.5	Resultante na corrente de uma sobretensão transitória impulsiva[17]	11
2.6	Transitório oscilatório de baixa frequência, originado pelo carregamento de uma banco de condensadores[17]	12
2.7	Formas de onda de tensão para diversos conteúdos harmónicos[1]	12
2.8	Onda modulada em amplitude por um sinal com 10% da tensão nominal e frequência 1/4 da fundamental	13
2.9	Sistema trifásico desequilibrado	13
3.1	Simbologia para a representação gráfica de uma máquina de estados	18
3.2	Máquina de estados da gramática (3.5)	18
3.3	Diagramas de máquinas de estados determinística e não-determinística	19
3.4	Secção de um ECG, amostrado usando um alfabeto de quantização	22
3.5	Secção de um ECG, usando o alfabeto definido em [23]	23
3.6	Autómato resultantes da análise de I'	23
3.7	Autómato inferido apartir do conjunto I_2	25
4.1	Esquema do método de aprendizagem	27
4.2	Representação de uma perturbação harmónica	29
4.3	Exemplos utilizados na aprendizagem da ocorrência de harmónicas	30
4.4	Modulação de amplitude simulando flutuações de tensão	31
4.5	Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de flutuações de tensão	32
4.6	Uso da exponencial negativa para simulação de uma interrupção	33
4.7	Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de uma interrupção	34

4.8	Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de uma cava	35
4.9	Exemplos para aprendizagem da ocorrência de uma sobretensão	36
4.10	Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de desequilíbrio da tensão na fase 1 . . .	38
4.11	Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de desequilíbrio da tensão na fase 2 . . .	39
4.12	Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de desequilíbrio da tensão na fase 3 . . .	40
4.13	Comparação dos sinais transformados por forma a obter o sinal a analisar gramaticalmente	41
4.14	Representação do alfabeto e do seu significado	42
4.15	Fluxograma do método de inferência	43
5.1	Comparação das transformadas (harmónicas)	45
5.2	Distâncias radiais referentes a harmónicas	46
5.3	Comparação das transformadas (flutuações de tensão)	47
5.4	Distâncias radiais referentes a flutuações de tensão	47
5.5	Comparação das transformadas (interrupção)	48
5.6	Distâncias radiais referentes a interrupções	49
5.7	Comparação das transformadas (cava de tensão)	50
5.8	Distâncias radiais referentes a cavas de tensão	50
5.9	Comparação das transformadas (sobretensão)	51
5.10	Distâncias radiais referentes a sobretensões	52
5.11	Comparação das transformadas (desequilíbrio da 1ª fase)	53
5.12	Distâncias radiais referentes a desequilíbrios na 1ª fase	53
5.13	Comparação das transformadas (desequilíbrio da 2ª fase)	54
5.14	Distâncias radiais referentes a desequilíbrios na 2ª fase	55
5.15	Comparação das transformadas (desequilíbrio da 3ª fase)	56
5.16	Distâncias radiais referentes a desequilíbrios na 3ª fase	56
5.17	Algoritmo de identificação de perturbações	62
5.18	Simulação da ocorrência de desequilíbrio de tensões	63
5.19	Comparação da transformação de desequilíbrio de tensões	63
5.20	Simulação da ocorrência de uma cava	64
5.21	Comparação da transformação da cava	64
5.22	Montagem usada na aquisição de dados reais	65
5.23	Representação gráfica dos dados adquiridos a partir da interrupção	66
5.24	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da interrupção	66
5.25	Representação gráfica dos dados adquiridos a partir da interrupção	66
5.26	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da interrupção	67
5.27	Representação gráfica dos dados adquiridos a partir da cava	67
5.28	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da cava	67
5.29	Representação gráfica dos dados obtidos da cava	68
5.30	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da cava	68
5.31	Representação gráfica dos dados obtidos de uma sobretensão	69
5.32	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da sobretensão	69
5.33	Representação gráfica dos dados adquiridos a partir de uma sobretensão	69
5.34	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da sobretensão	70
5.35	Representação gráfica dos dados adquiridos a partir de flutuações	70
5.36	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir de flutuações	70
5.37	Representação gráfica dos dados adquiridos a partir de flutuações	71
5.38	Comparação dos dados transformados adquiridos a partir de flutuações	71

Lista de Tabelas

3.1	Hierarquia de Chomsky	16
3.2	Alfabeto usado na análise do ECG, adaptado de [23]	22
4.1	Ordens e valores simulados	28
4.2	Valores do alfabeto	42
4.3	Tabela da quantidade de padrões guardados	43
5.1	Resumo das expressões regulares inferidas, baseadas nos diferentes alfabetos	61

Simbologia e Glossário

Acrónimos

AT	Alta tensão
DFA	Deterministic finite automaton, máquina de estados finita e determinística
DWT	Discrete wavelet transform, transformada do wavelet no discreto
ECG	Electrocardiograma
MRA	Multiresolution Analysis, técnicas de análise de sinais
MT	Média tensão
NFA	Nondeterministic finite automaton, máquina de estados finita e não-determinística
PLL	Phase Locked Loop, malha de captura de fase em português
pu	Por unidade, divisão no valor lido pelo valor nominal
RMS	Root Mean Square ou valor Eficaz
STFT	Short-Time Fourier Transform
TFR	Time-Frequency Representations, representação do sinal no espectro tempo-frequência
WT	Wavelet Transform, transformada wavelet

Simbologia

λ	Elemento neutro da concatenação
Σ	Alfabeto da linguagem
Σ^*	Conjunto de todas as palavras do alfabeto
Σ^+	Conjunto de todas as palavras não vazias
Σ_N	Alfabeto não terminal
Σ_{T_1}	Primeira versão do alfabeto terminal, consiste em $\{a, b, c, d, e, f\}$
Σ_{T_2}	Segunda versão do alfabeto terminal, consiste em $\{a, b, c, d, e, f, u, l\}$
Σ_{T_3}	Terceira versão do alfabeto terminal, consiste em $\{a, b, c, d, e, f, u, h, l, n\}$
Σ_T	Alfabeto terminal

G	Gramática da linguagem
I	Sequência completa de informação
J	Sequência incompleta de informação
$L(G)$	Linguagem gerada pela gramática G
R	Sistema de rescrita da gramática
S	Símbolo inicial
u_ε	Componente que contém as possíveis perturbações
u_{MORPH}	Resultado da dilatação do sinal
$v(t)_{flu1}$	Sinal de aprendizagem de flutuações de tensão, primeiro exemplo
$v(t)_{flu2}$	Sinal de aprendizagem de flutuações de tensão, segundo exemplo
$v(t)_{flu3}$	Sinal de aprendizagem de flutuações de tensão, terceiro exemplo
$v(t)_{flu4}$	Sinal de aprendizagem de flutuações de tensão, quarto exemplo
$v(t)_{int1}$	Sinal de aprendizagem de uma interrupção, primeiro exemplo
$v(t)_{int2}$	Sinal de aprendizagem de uma interrupção, segundo exemplo
$v(t)_{int3}$	Sinal de aprendizagem de uma interrupção, terceiro exemplo
$v(t)_{int4}$	Sinal de aprendizagem de uma interrupção, quarto exemplo
$v(t)_{sag1}$	Sinal de aprendizagem de uma cava de tensão, primeiro exemplo
$v(t)_{sag2}$	Sinal de aprendizagem de uma cava de tensão, segundo exemplo
$v(t)_{sag3}$	Sinal de aprendizagem de uma cava de tensão, terceiro exemplo
$v(t)_{sag4}$	Sinal de aprendizagem de uma cava de tensão, quarto exemplo
$v(t)_{swell1}$	Sinal de aprendizagem de uma sobretensão, primeiro exemplo
$v(t)_{swell2}$	Sinal de aprendizagem de uma sobretensão, segundo exemplo
$v(t)_{swell3}$	Sinal de aprendizagem de uma sobretensão, terceiro exemplo
$v(t)_{swell4}$	Sinal de aprendizagem de uma sobretensão, quarto exemplo
$v(t)_{unbf11}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 1, primeiro exemplo
$v(t)_{unbf12}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 1, segundo exemplo
$v(t)_{unbf13}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 1, terceiro exemplo
$v(t)_{unbf14}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 1, quarto exemplo
$v(t)_{unbf21}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 2, primeiro exemplo
$v(t)_{unbf22}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 2, segundo exemplo
$v(t)_{unbf23}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 2, terceiro exemplo

LISTA DE TABELAS

$v(t)_{unb_{f24}}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 2, quarto exemplo
$v(t)_{unb_{f31}}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 3, primeiro exemplo
$v(t)_{unb_{f32}}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 3, segundo exemplo
$v(t)_{unb_{f33}}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 3, terceiro exemplo
$v(t)_{unb_{f34}}$	Sinal de aprendizagem de um desequilíbrio de tensão na fase 3, quarto exemplo
z	String finita do alfabeto

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é feita a apresentação do problema estudado nesta dissertação e o seu crescente interesse no contexto actual. São referenciadas algumas soluções actuais, abrangendo diferentes áreas tecnológicas.

1.1 Enquadramento e motivação

O conceito de Qualidade de Energia foi utilizado pela primeira vez numa publicação em 1968 [1], no seguimento de um estudo levado a cabo pela Marinha dos Estados Unidos da América. Este conceito não é estanque, sendo que a sua definição foi mudando ao longo do tempo. Inicialmente o foco estava na continuidade do serviço (duração e quantidade de interrupções); hoje em dia, são tidas em consideração características como amplitude, desequilíbrio de tensões ou distorção harmónica.

Características como estas não são novas, mas o interesse pelas mesmas tem aumentado, com o incremento de sistemas electrónicos presentes na rede eléctrica. Dispositivos como variadores electrónicos de velocidade, circuitos de iluminação, electrodomésticos, fornos de arco e conversores electrónicos de potência em fontes de energia renovável são geralmente causadores de perturbações na rede, além de que também eles são afectados por estes eventos.

O avanço da tecnologia tem tornado os dispositivos cada vez mais sensíveis e dependentes da rede de energia eléctrica. Qualquer evento que afecte a rede vai também afectar os diferentes sistemas que lhe estão ligados, causando falhas que, provavelmente, vão afectar a produção e, por conseguinte, a facturação das indústrias. Torna-se, assim, necessária efectuar a monitorização da rede, a fim de identificar as perturbações, analisá-las e resolvê-las.

De uma forma básica, é possível fazer o reconhecimento dos eventos ocorridos na rede eléctrica através de um reconhecimento visual da forma de onda. No entanto, procura-se que o sistema seja capaz de reconhecer e analisar de forma automática e objectiva o sinal da rede, sem recorrer a um reconhecimento visual, que está dependente da sensibilidade do utilizador. Assim, é necessário pesquisar ferramentas inovadoras para a análise automática da qualidade de energia. Apesar da existência de algumas soluções, as ferramentas actuais tendem a funcionar apenas para algumas situações e em determinadas condições. Como tal, é ainda necessária pesquisa nesta área.

1.2 Revisão bibliográfica

A necessidade de uma crescente monitorização da qualidade de energia fornecida suscitou o aparecimento de métodos de identificação e classificação automática dos eventos ocorridos. Alguns destes métodos podem ser agrupados da seguinte forma:

- Análise da forma de onda e valor eficaz do sinal;
- Morfologias matemáticas;
- Recurso a *Time-Frequency Representations* (TFRs) e *Multiresolution Analysis* (MRA).

É apresentado em [2] uma forma de análise da qualidade de energia capaz de detectar vários tipos diferentes de cavas, baseado-se na ocorrência de eventos, em que a forma de onda é dividida em segmentos. É aplicado um filtro de Kalman à forma de onda, usando os resultados na segmentação; em seguida, cada segmento é caracterizado em relação à amplitude e harmónicas, correlacionado-o com as outras fases, resultando num índice; no final, é usado um sistema pericial que, através das suas regras e dos índices, classifica os eventos. Na figura 1.1, apresenta-se o diagrama referente à parte de detecção; na figura 1.2, verifica-se a mudança dos valores de amplitude das fases, é na alteração destes valores que ocorre a detecção, ou seja, nas zonas sombreadas, a parte residual do filtro de Kalman aumenta com estas alterações, sendo possível obter os índices de detecção.

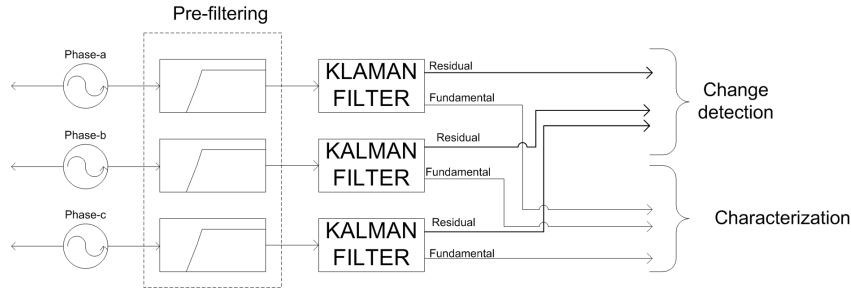


Figura 1.1: Detecção de eventos na forma de onda [2]

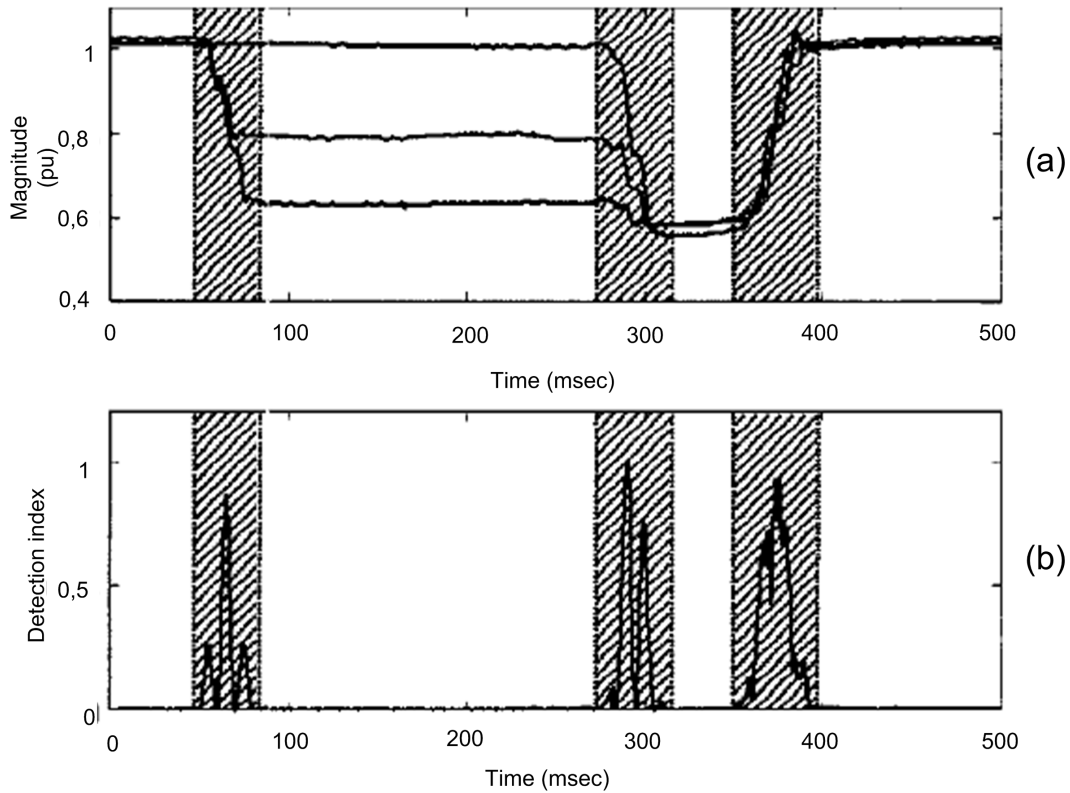


Figura 1.2: Amplitudes fundamentais e índices de detecção [2]

Dos mesmos autores, é apresentada em [3] uma melhoria do método anterior, sendo que o uso da forma de onda na sua íntegra é substituída pelo seu valor eficaz. Desta forma, existe uma redução significativa da memória necessária para guardar a informação, mas é colocada em questão a possível perda de informação e ainda a escolha da taxa de actualização do valor eficaz, sendo possível fazê-la de uma forma contínua (por ciclo) ou de forma discreta (estipula-se um intervalo de tempo). Escolhendo a segunda opção, reduz-se a quantidade de memória necessária, mas introduz-se algum erro na análise, visto que uma ocorrência dentro da janela temporal poderá demorar mais tempo a ser detectada ou não ser detectada de todo, sendo a escolha do intervalo de tempo um assunto delicado. Os autores demonstraram que o método proposto que a análise automática de cavas não sofre alterações, mas o facto de usar o valor eficaz implica perda de informação, resultando na impossibilidade de analisar a ocorrência de harmónicas. A classificação dos eventos é feita da mesma forma que anteriormente, servindo-se de um sistema pericial.

As morfologias matemáticas são utilizadas essencialmente na área de processamento de imagem, mas também se encontram aplicações na monitorização da qualidade de energia, tal como é referenciado em [4]. Neste artigo, o método proposto visa uma monitorização contínua e a detecção do máximo possível de eventos. A arquitectura foi dividida em 3 partes: pré-processamento, detecção e classificação. No pré-processamento, procede-se a segmentação e à normalização do sinal, usando, por exemplo valor nominal da tensão. Na detecção, as perturbações são separadas em 2 grupos distintos, aplicando um procedimento diferente a cada grupo, sendo estes grupos os seguintes:

- Sobretensões transitórias e distorção da forma de onda;
- Cavas, sobretensões e interrupções.

O tratamento do primeiro grupo envolve o uso de um filtro passa-alto para se obter apenas as frequências superiores à fundamental, é usada a operação dilatação¹, o seu resultado é usado na comparação com um limite pré-definido e, assim, classificado ou não conforme o grupo em que está inserido. Para a análise do segundo grupo, é calculado o valor eficaz, verificando-se se está dentro dos limites ou não. Apresenta-se na figura 1.3 o diagrama funcional do método.

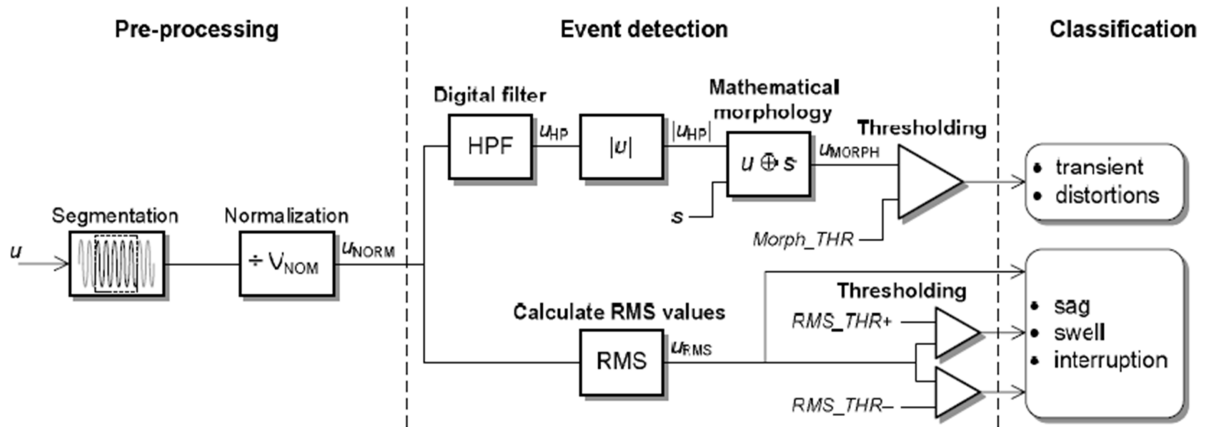


Figura 1.3: Diagrama do método proposto em [4]

¹Transformação morfológica que combina dois conjuntos, usando adição vectorial.

Na figura 1.4, apresentam-se os resultados normalizados obtidos em situação de transitório e distorção da forma de onda.

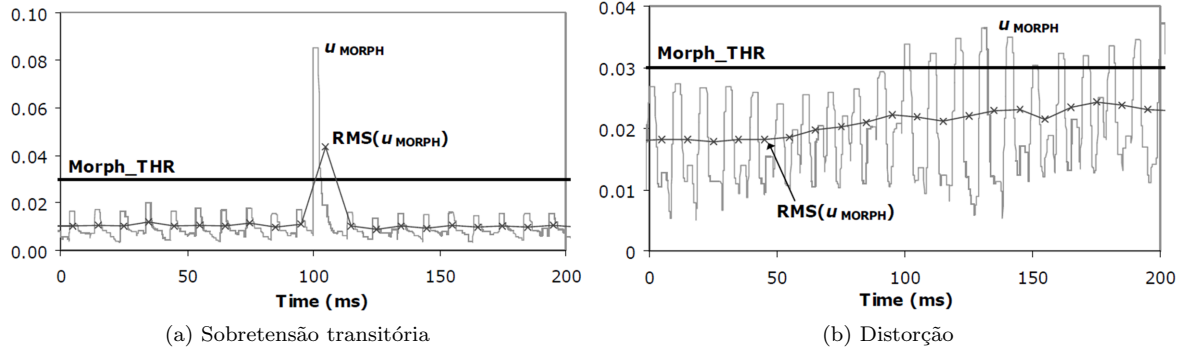


Figura 1.4: Resultados de u_{MORPH} [4]

Existe um outro método semelhante ao anterior, apresentado em [5], detectando transitórios e distorção harmónica. Recorrendo a algumas alterações, como, por exemplo, o modo de separação da frequência fundamental das outras frequências harmónicas, através do algoritmo *four-parameter sine-fitting* [6], é possível analisar a componente harmónica, através da operação de morfologias matemáticas conhecida como fecho², correlacionando o resultado com o valor limite e classificando assim o tipo de perturbação. Na figura 1.5, apresenta-se o diagrama funcional do sistema.

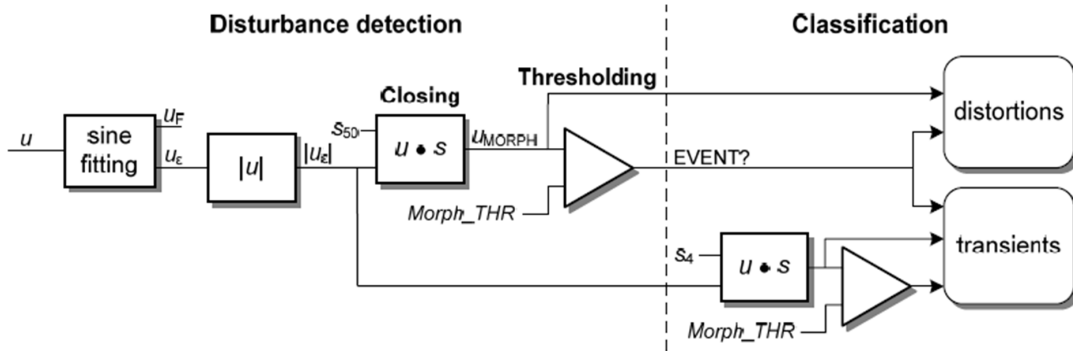


Figura 1.5: Diagrama do método de [5]

Na figura 1.6 verifica-se uma perturbação de tipo transitório: é recebida a forma de onda da tensão com a onda inferida pelo algoritmo *four-parameter sine-fitting*, calcula-se u_e através da diferença dos valores reais em relação aos esperados, aplica-se a operação fecho e é feita a classificação do evento.

²Operação morfológica que usa as operações básica, dilatação e erosão.

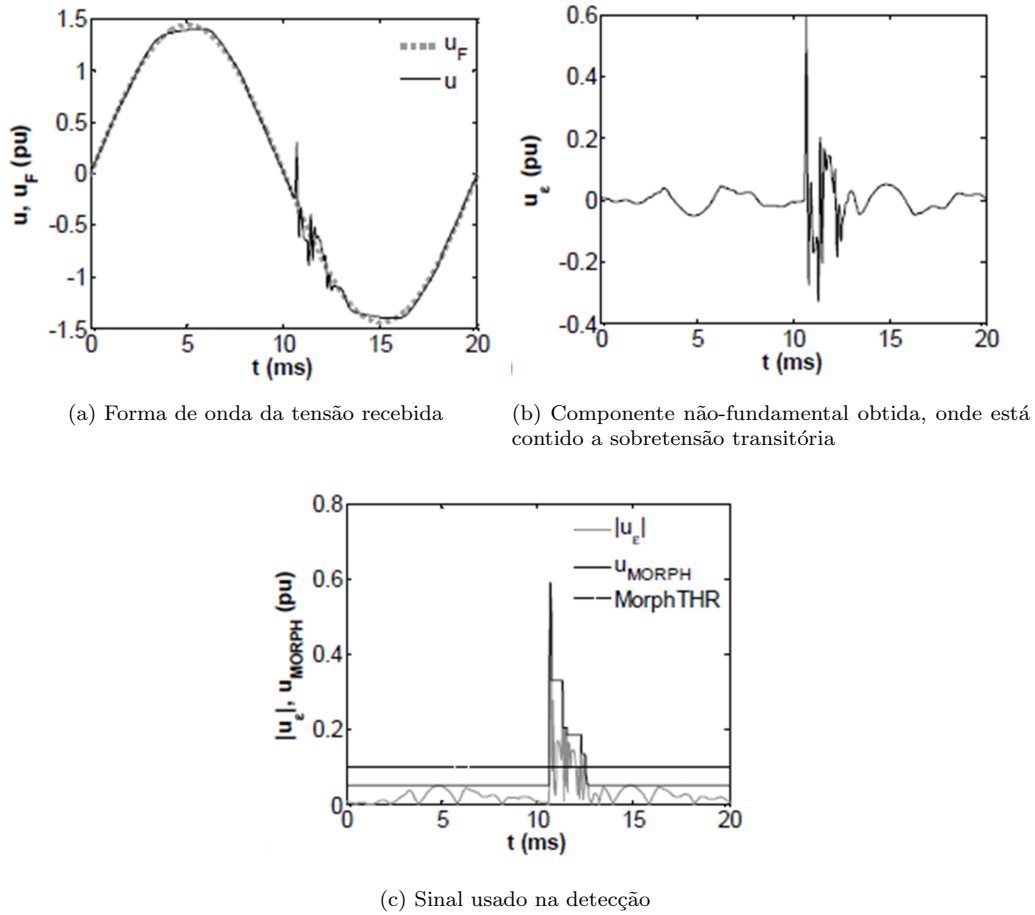


Figura 1.6: Resultados obtidos numa situação de sobretensão transitória [5]

O uso de representações e análise temporais e de frequência impõe uma grande ênfase na monitorização da qualidade de energia, principalmente o uso de STFT (*Short-Time Fourier Transform*), *Wavelet*³ e uma variação do *wavelet* chamada Transformada S. A capacidade de a STFT analisar uma parte localizada do sinal é a razão do seu uso na análise da qualidade de energia, como é explicado em [8]. O uso da STFT está bem adaptado à forma como o engenheiro está habituado à visualização de um sinal sinusoidal. No entanto, usando *Wavelet*, consegue-se obter resultados mais precisos, apesar da maior dificuldade de cálculo. A grande vantagem do *Wavelet* para a STFT é a sua capacidade de ter uma janela de aquisição que varia no tempo-frequência; na STFT é necessário definir inicialmente a janela, não podendo alterá-la ao longo do sinal. Esta variação da janela transmite uma flexibilidade ao *Wavelet* que não é possível com a STFT.

³Método de decompor um sinal em várias funções na frequência e conseguinte análise das funções com a possibilidade de diferentes escalas de frequência e tempo[7].

A *Short-Time Fourier Transform* é bastante usada em sinais estacionários, ou seja, cujas propriedades não evoluem no tempo. Se o sinal modificar a sua dinâmica a análise não será correcta devido ao facto de a janela ser fixa; se o sinal contiver componentes de alta e baixa frequência, não será possível um resultado correcto[9]. Na figura 1.7, apresenta-se a comparação entre as diferentes resoluções das janelas.

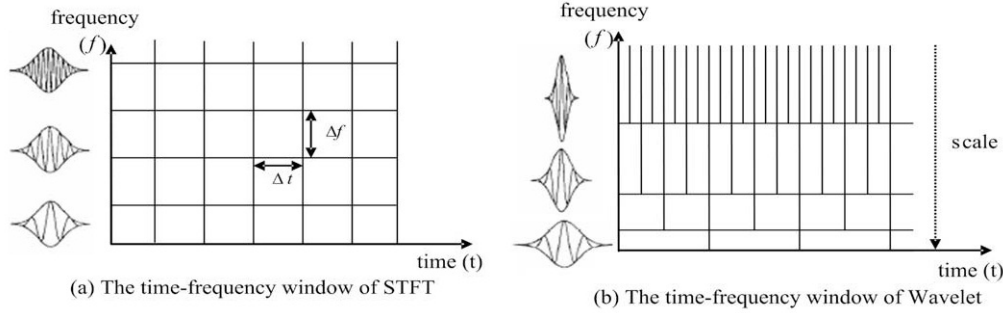


Figura 1.7: STFT vs Wavelet[10]

Um método muito comum, apresentando bons resultados de *Wavelet*, é o DWT - *Discrete Wavelet Transform*, segundo o qual é necessário decompor o sinal original em vários níveis. Segundo [11], admite-se que uma decomposição efectuada até ao nível 6 é considerada suficiente para obter resultados fidedignos, em diferentes tipos de perturbações. Apresenta-se como exemplo a figura 1.8 onde a ocorrência de uma sobretensão transitória impulsiva pode ser identificada logo no primeiro nível de decomposição⁴ do sinal (DC1).

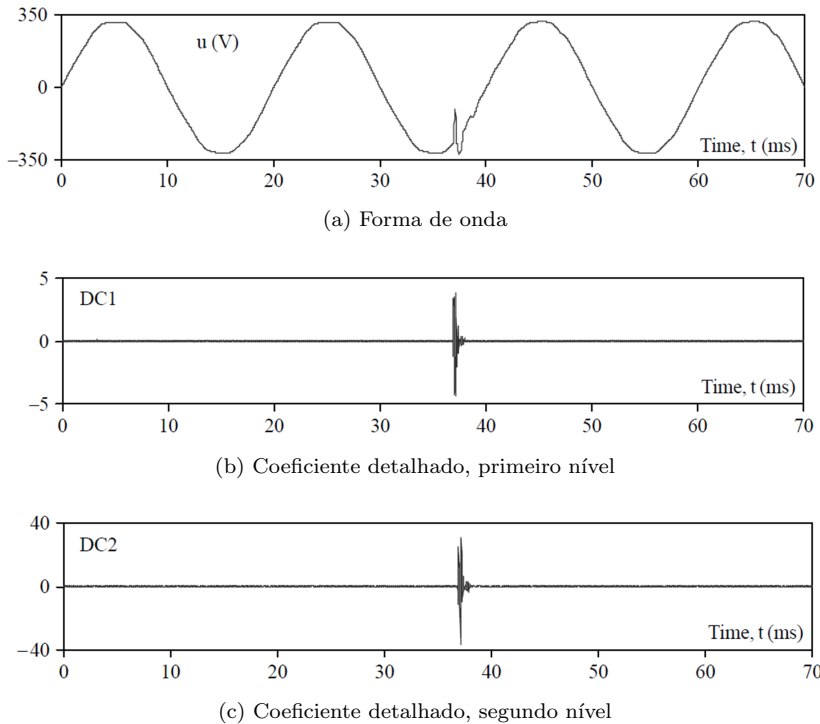


Figura 1.8: Medição da perturbação na onda[12]

Na situação seguinte, considera-se uma interrupção, verificando-se a necessidade de mais níveis de decomposição para obter resultados razoáveis(figura 1.9).

⁴É definido pelos parâmetros de decomposição usados na expressão matemática da transformada.

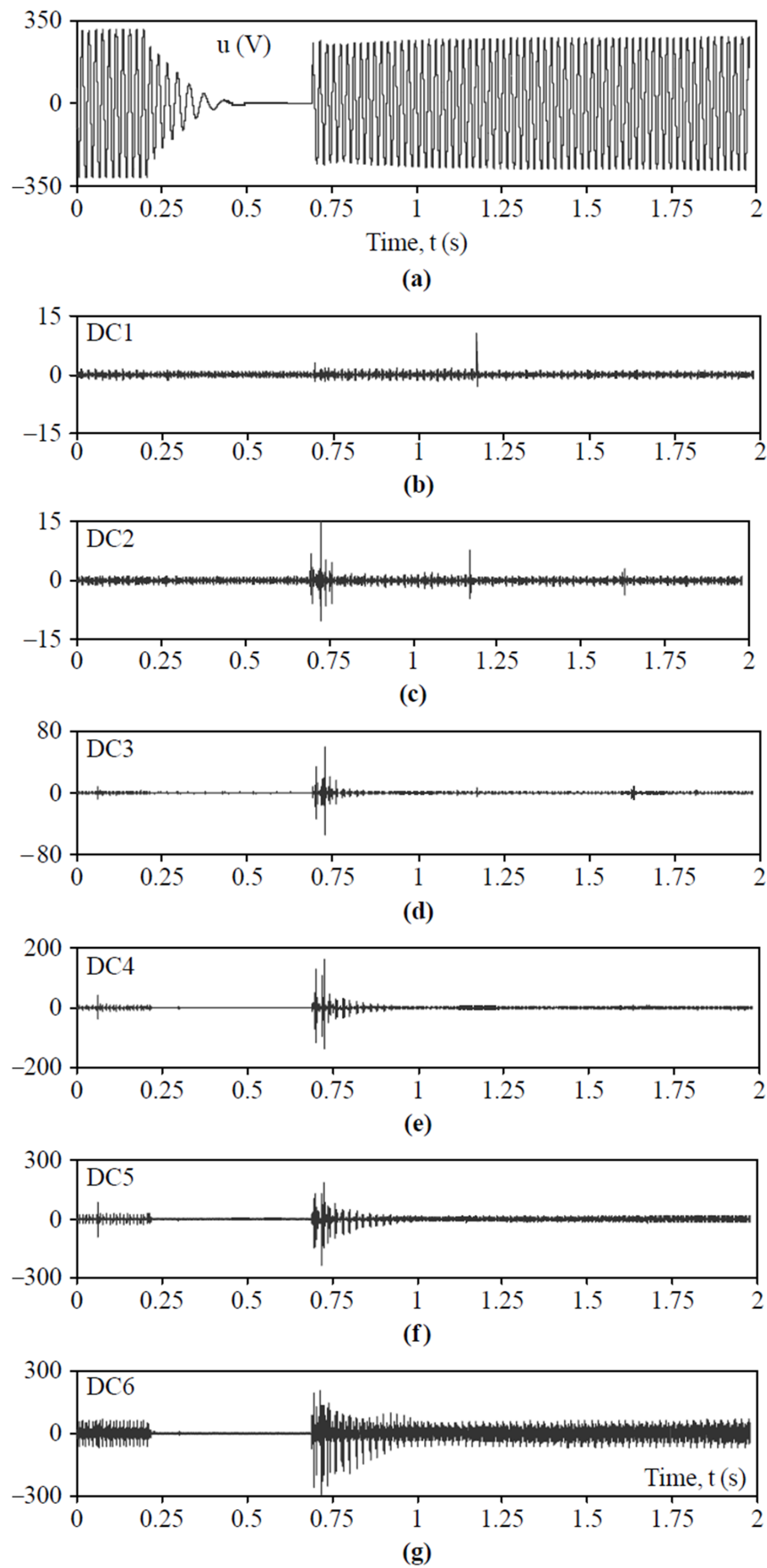


Figura 1.9: Medições obtidas na situação de interrupção[12]

No segundo nível é totalmente visível o fim da interrupção, mas não o início, sendo necessário para tal, decompor mais o sinal. Esta é uma desvantagem no uso de *Wavelets*, pois a necessidade do aumento de níveis de decomposição aumenta também a complexidade de computação, tornando-se num processo moroso e pesado em termos computacionais, com a exigência de uma boa análise e escolha dos níveis de decomposição. Em [13] é apresentado um método em que é feito o estudo dos níveis de decomposição, a fim de se conseguir uma boa relação resultados-computação, para se melhorar a eficiência computacional. Os métodos vistos na área de MRA centram-se principalmente na detecção das perturbações e não tanto na sua classificação automática; em grande parte, é usado um sistema que se assemelha a um sistema pericial, ou seja, o uso de regras pré-definidas para a automatização dos resultados. Em [14] a detecção é realizada através de *Discrete-Wavelet*, usando os coeficientes obtidos como entradas directas numa rede neuronal probabilística que irá identificar a ocorrência; foi colocada também ênfase no número mínimo de decomposições, de forma a criar um método com pouco tempo de computação. Um grande entrave ao uso da rede neuronal probabilística é a quantidade razoável de memória necessária.

Vários autores [9, 15] utilizam uma forma de *Wavelet* melhorada, Transformada S (não confundir com a Transformada de Laplace), sendo uma melhoria da transformada *wavelet* utilizando uma janela de aquisição com recurso a uma distribuição normal. Esta transformada tem características superiores à WT e STFT, estando a resolução da sua janela de aquisição dependente da frequência do sinal. É uma boa ferramenta para a detecção de picos de alta frequência e de variações mais longas.

Capítulo 2

Qualidade de energia

Não existe uma definição simples e clara do que se entende por qualidade de energia. De uma forma genérica, considera-se que “a qualidade é a adequação de determinado bem ou serviço à sua finalidade ou uso”[1]. Do ponto de vista energético, a qualidade de energia é vista como a qualidade e continuidade da onda de tensão providenciada pelo fornecedor. Qualquer fenómeno na rede eléctrica que afecte o regime normal de uma máquina ou sistema é considerado como uma perturbação na qualidade de energia. Esta perturbação pode resultar no mau funcionamento do sistema ou até danificar equipamento, sendo essencial implementar mecanismos de monitorização da rede.

É possível enumerar alguns tipos de distúrbios existentes mais típicos: cava de tensão, sobretensão, interrupção, sobretensão transitória impulsiva e oscilatória, distorção harmónica, flutuações da tensão e desequilíbrio de tensões. De seguida apresenta-se a definição de cada um deles.

Cava de tensão (do Inglês *sag*), descreve-se como a descida do valor eficaz da tensão para valores de 0,9 a 0,01 pu[16] durante um curto espaço de tempo, tipicamente de 10 ms a 1 minuto. Pode ser provocada pelo arranque de motores de forte carácter indutivo. Na figura 2.1, apresenta-se um exemplo de uma cava e, na figura 2.2 a respectiva variação do valor eficaz.

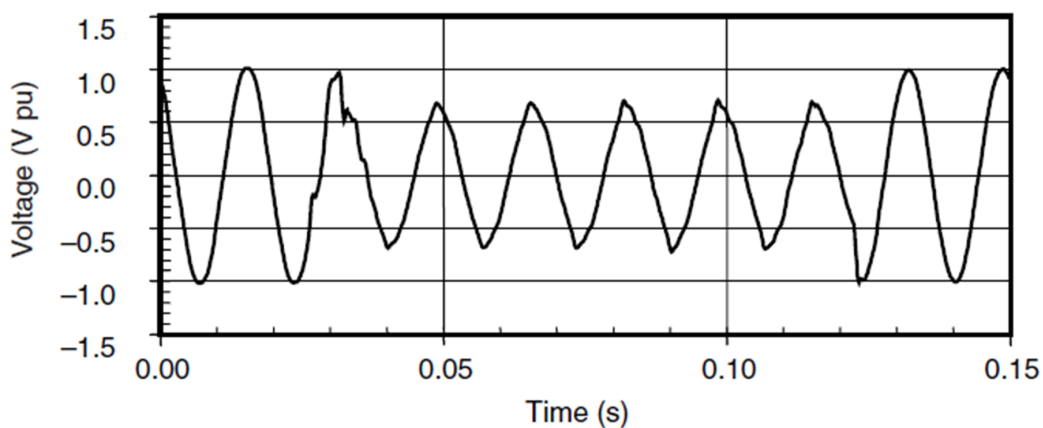


Figura 2.1: Forma de onda de uma cava de tensão [17]

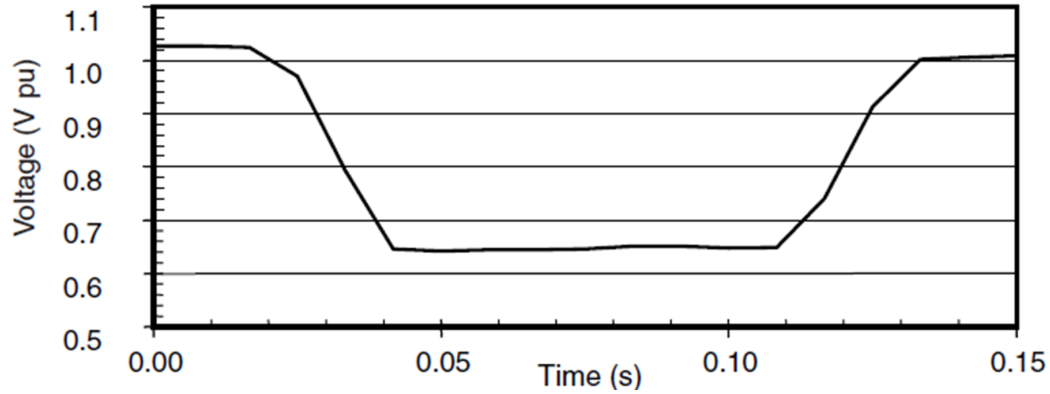


Figura 2.2: Valor eficaz de uma perturbação tipo cava de tensão [17]

Sobretensão (do Inglês *swell*) é o fenómeno dual da cava, ou seja, corresponde a uma subida do valor eficaz da tensão, considerada a partir de 1,1 pu. Pode ocorrer quando é desconectada uma carga de elevada potência. Na figura 2.3, apresenta-se esta perturbação.

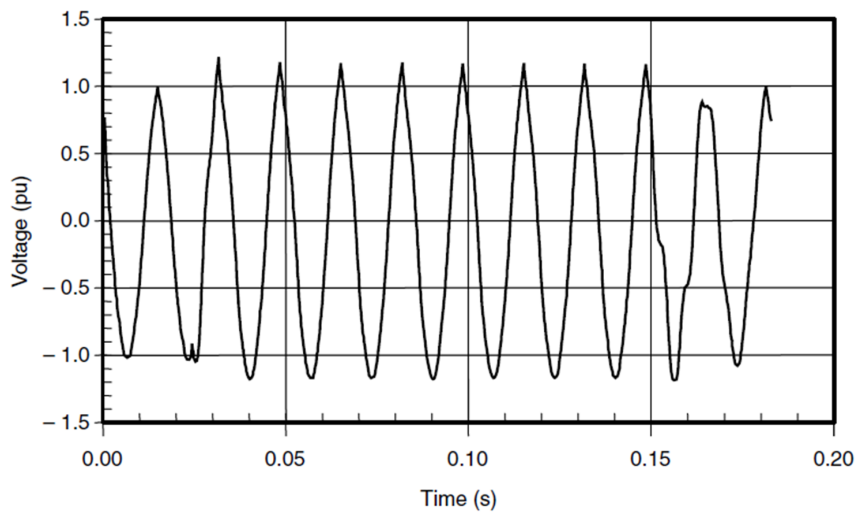


Figura 2.3: Forma de onda de uma sobretensão[17]

A interrupção (do Inglês *interruption*) é definida como a redução da tensão para valores abaixo de 0,01 pu por um período de tempo não superior a 3 minutos (interrupção breve) ou superior a 3 minutos (interrupção longa), podendo ter origem no mau funcionamento de disjuntores[16]. Na figura 2.4, apresenta-se o comportamento dos valores eficazes da tensão, no caso de um sistema trifásico.

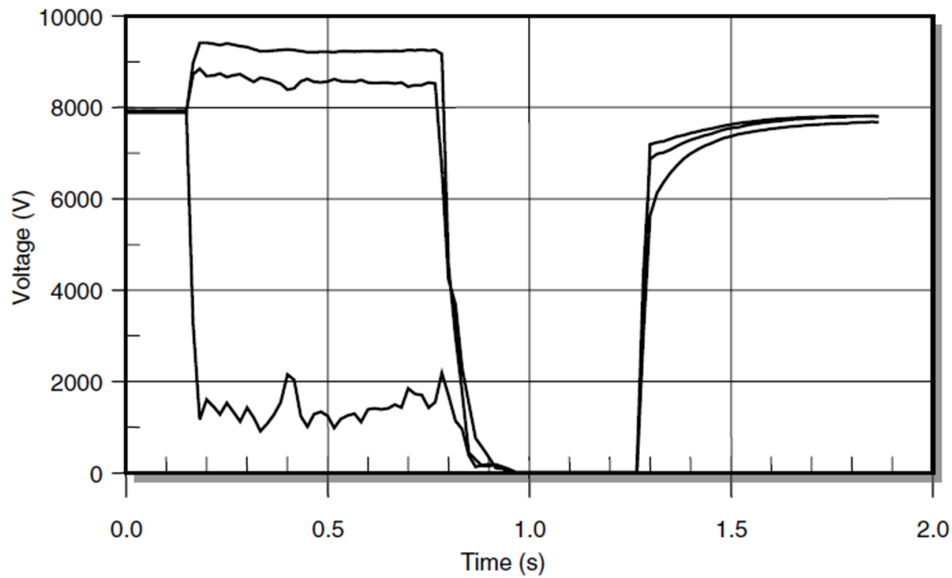


Figura 2.4: Valores eficazes de um sistema trifásico aquando da ocorrência de uma interrupção breve e respectiva recuperação[17]

Uma sobretensão transitória impulsiva (do Inglês *impulsive transient*) consiste na variação unidireccional da tensão, acontecendo de forma mais frequente quando uma descarga eléctrica atmosférica atinge directamente algum ponto da rede eléctrica[18]. Geralmente, o seu efeito não vai muito além da zona de ocorrência. Na figura 2.5, verifica-se a corrente resultante de uma sobretensão transitória impulsiva, consequência de uma descarga eléctrica.

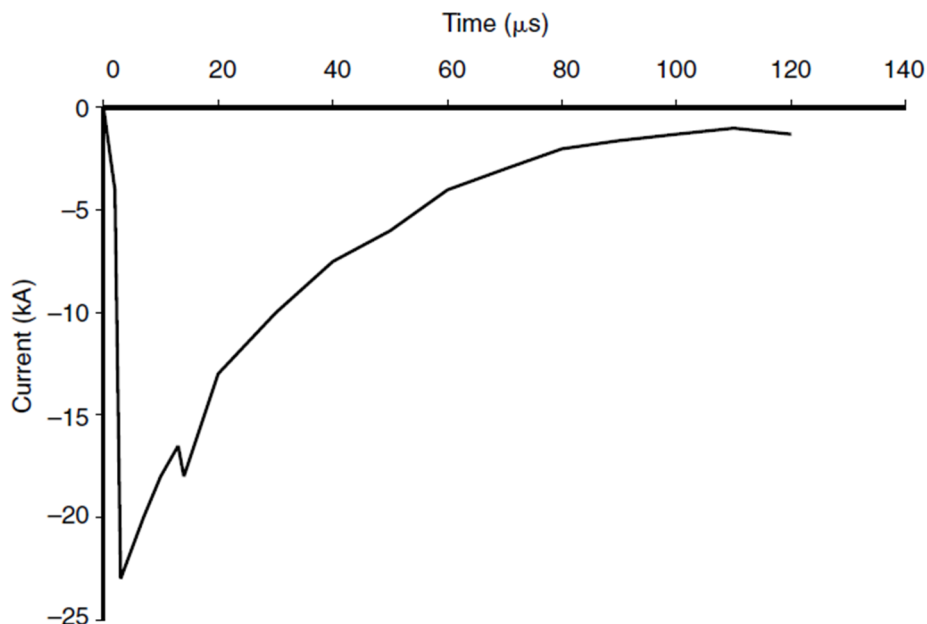


Figura 2.5: Resultante na corrente de uma sobretensão transitória impulsiva[17]

Uma sobretensão transitória oscilatória (do Inglês *oscillatory transient*) é semelhante à sobretensão impulsiva, mas a variação ocorre de uma forma bidireccional. A polaridade da tensão/corrente muda

rapidamente e está relacionada com a ressonância existente durante a comutação de circuitos[18]. Este acontecimento pode ser uma consequência de uma sobretensão transitória impulsiva que excite a frequência natural dos sistemas electrónicos.

Em geral, podemos usar a expressão de transitório em substituição da expressão mais longa, sobretensão transitória. Na figura 2.6, apresenta-se um transitório oscilatório e o seu efeito na forma de onda.

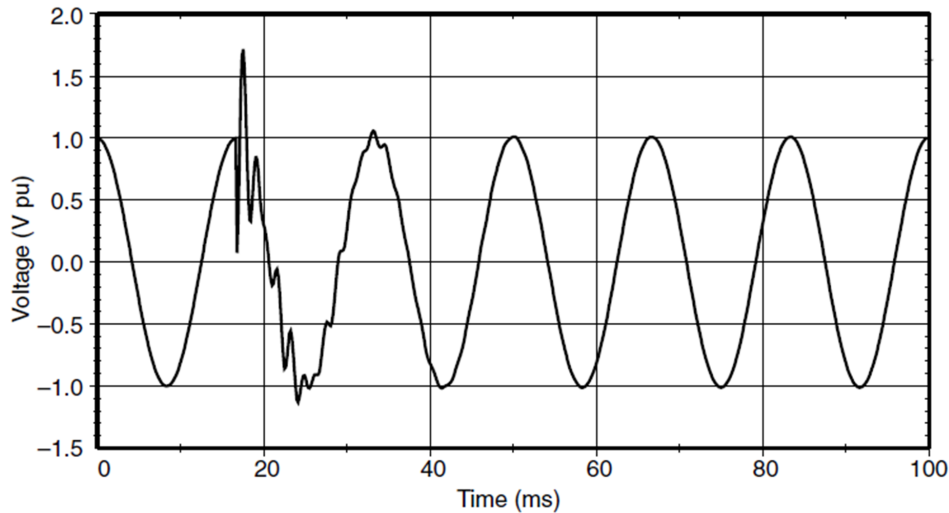


Figura 2.6: Transitório oscilatório de baixa frequência, originado pelo carregamento de uma banco de condensadores[17]

A distorção harmónica (do Inglês *harmonic distortion*) é uma distorção na forma de onda causada pela existência de harmónicas na rede, que afectam o sinal de frequência fundamental. Até sensivelmente à década de 70, este fenómeno não tinha grande relevância, visto que a maior parte das cargas eléctricas domésticas e industriais era linear. Com o desenvolvimento da electrónica, a percentagem de cargas não-lineares aumentou, contribuindo para o aumento deste tipo de perturbação. Este fenómeno pode acontecer, por exemplo, quando no sistema existe uma carga industrial não-linear ou devido ao uso de fontes comutadas em televisores, computadores ou outro equipamento electrónico muito comuns em residências[19]. Na figura 2.7, é apresentado o resultado do efeito das diferentes harmónicas ímpares na forma de onda.

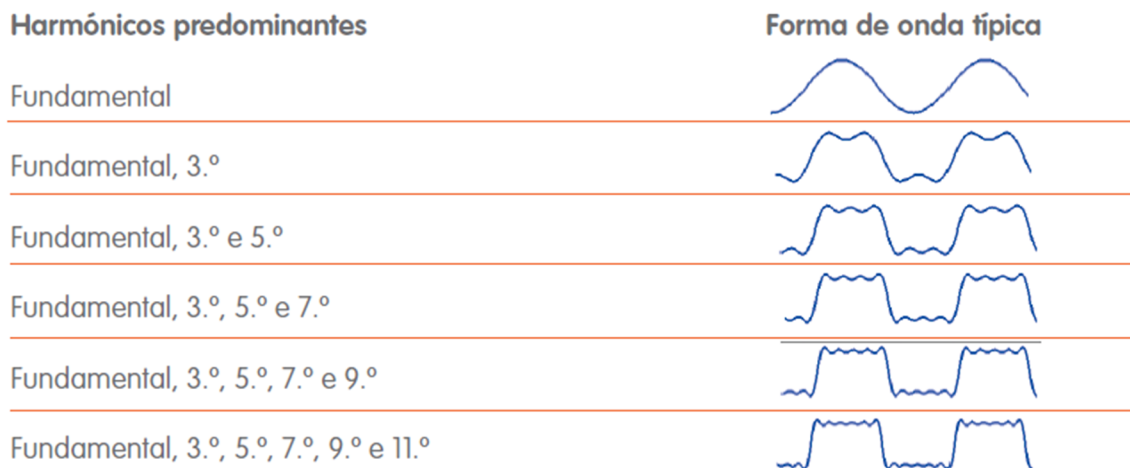


Figura 2.7: Formas de onda de tensão para diversos conteúdos harmónicos[1]

Flutuações (do Inglês *fluctuations*¹) são pequenas variações cíclicas da envolvente da tensão [16], como se a onda fosse modulada em amplitude por um sinal de baixa frequência (figura 2.8). Podem ser apontadas algumas causas comuns: motores com rápidas mudanças de carga, fornos de arco eléctrico, equipamentos de soldadura [1].

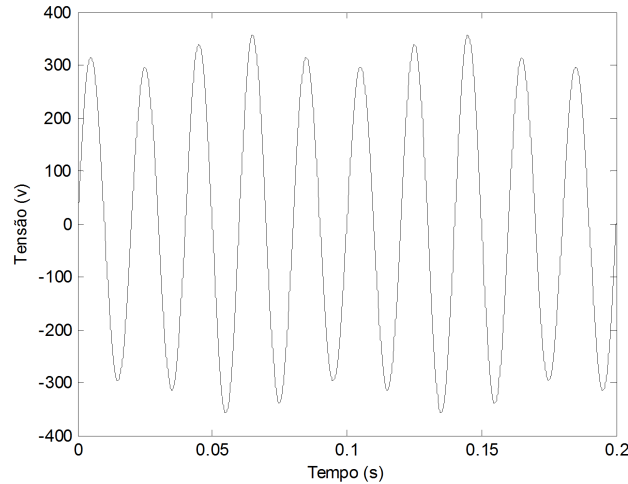


Figura 2.8: Onda modulada em amplitude por um sinal com 10% da tensão nominal e frequência 1/4 da fundamental

Desequilíbrio de tensão (do Inglês *voltage imbalance*) caracteriza-se pela variação de amplitude e/ou ângulo de uma ou mais fases dum sistema trifásico, sendo que as tensões podem ter amplitudes diferentes ou o desfasagem ser diferente de 120° [16]. Este fenómeno pode ser causado por diferentes cargas nas fases, podendo, por exemplo, originar um aumento de temperatura em máquinas de indução. De uma forma geral as cargas em MT e AT são trifásicas e equilibradas. No entanto, a existência de cargas monofásicas e bifásicas ligadas a estas pode originar desequilíbrios na rede trifásica. Esta perturbação, geralmente, muito reduzida[1] e, portanto, não representa uma parte muito significativa das perturbações da qualidade de energia. Na figura 2.9, verifica-se o desequilíbrio de tensões: a azul a fase normal; a preto, a fase com menor amplitude; a vermelho, a fase com menor amplitude e desfasagem diferente de 120° .

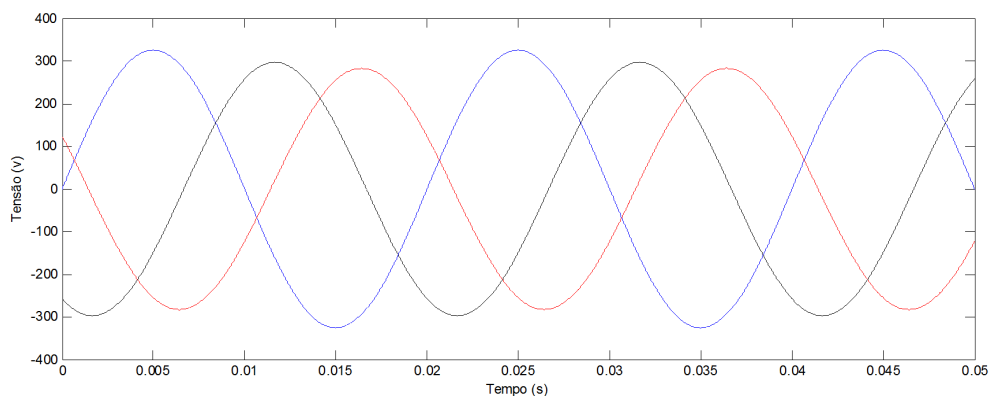


Figura 2.9: Sistema trifásico desequilibrado

¹Quando a flutuação cria uma impressão visual de instabilidade luminosa, é chamado de *flicker*.

Capítulo 3

Linguagens Formais e Inferência Gramatical

Neste capítulo é feita a introdução a linguagens formais e inferência gramatical. Apresenta-se uma síntese da teoria de gramáticas, e a sua relação com a detecção de padrões. De forma a ser possível efectuar reconhecimento de padrões é necessário inferir as gramáticas que os representam, tipicamente com recurso a exemplos de aprendizagem ou treino. Através de algoritmos de aprendizagem é possível, dado um conjunto de dados de aprendizagem, inferir a gramática subjacente. As gramáticas podem, ser apresentadas de uma forma gráfica, usando máquinas de estado para o efeito, ou ainda, de uma forma algébrica, através de expressões regulares.

Neste capítulo é ainda, analisada a questão da escolha do alfabeto a utilizar, e a forma como esta escolha afecta todo o processo de inferência e, consequentemente, a detecção de padrões.

3.1 Linguagens formais - gramáticas

O estudo de linguagens formais como modelo matemático de gramáticas começou com Noam Chomsky, inicialmente para descrever linguagens naturais. Mais tarde, a gramática começou a ser usada para descrever conjuntos de palavras em vários tipos de máquinas de computação.

Entende-se como linguagem, o conjunto de todas as frases geradas pelas regras gramaticais. Considera-se alfabeto o conjunto finito e não-vazio de todos os símbolos da linguagem, representado por Σ .

A palavra de um alfabeto, representada por z , é uma *string* finita, com zero ou mais símbolos de Σ que se podem repetir. A *string* de tamanho zero, ou seja, sem símbolos, é chamada palavra vazia e representa-se por λ .

O conjunto de todas as palavras do alfabeto Σ é representado por Σ^* , e o conjunto de todas as palavras não-vazias de Σ expressa-se por Σ^+ .

A concatenação de *strings* é possível, ou seja, existindo z_1 e z_2 , a sua concatenação será z_1z_2 . λ apresenta-se como o elemento neutro, onde $z\lambda=\lambda z=z$. A concatenação goza ainda da propriedade associativa e, na situação de sucessivas repetições de um símbolo, podemos representá-la como z^i , onde i é um número inteiro positivo.

O comprimento de uma palavra é definido pelo número de símbolos que constituem essa palavra e representa-se por $|z|$.

A definição de uma gramática é feita através de um quádruplo: $G = (R, \Sigma_N, \Sigma_T, S)$, onde R é o par (Σ, P) , designado sistema de reescrita, Σ_N e Σ_T representam os alfabetos não-terminal e o

terminal, respectivamente, verificando a condição $\Sigma_N \cap \Sigma_T = \emptyset$. S é um símbolo inicial. P é o grupo de produções do tipo $\alpha \rightarrow \beta$, onde α e β são *strings* e α tem pelo menos um símbolo do alfabeto não-terminal.

Considera-se uma gramática como um gerador de linguagens, definida por (3.1). Contudo, é possível considerar a gramática como um detector (máquinas de estados) usado para determinar se uma dada *string* pertence à linguagem.

$$L(G) = \{z \in \Sigma_T^* \mid S \Rightarrow z\} \quad (3.1)$$

Como exemplo, considere-se uma linguagem gerada por uma gramática, cujo alfabeto não terminal é dado por (3.2), o alfabeto terminal é dado por (3.3) e o grupo de produções por (3.4).

$$\Sigma_N = \{S, X, Y\} \quad (3.2)$$

$$\Sigma_T = \{a, b\} \quad (3.3)$$

$$P = \{S \rightarrow aS, S \rightarrow aX, X \rightarrow bS, X \rightarrow aY, Y \rightarrow bS, S \rightarrow a\} \quad (3.4)$$

Usando os elementos dos alfabetos (3.2) e (3.3), partindo do símbolo inicial e aplicando sucessivamente as produções de (3.4), podem obter-se os seguintes exemplos:

$S, aS, aaX, aabS, aaba; S, aS, aaX, aaaY, aaabS, aaaba$. Das várias palavras geradas pela gramática encontram-se “*aaba*”, “*aaaba*”.

A existência de vários tipos de gramáticas originou diferentes classificações. Usando como base o tipo de produções que regem a gramática, apresenta-se na tabela 3.1 a Hierarquia de Chomsky, onde as gramáticas são divididas em quatro tipos distintos.

Tabela 3.1: Hierarquia de Chomsky

Tipo	Designação	Produções($\alpha \rightarrow \beta$)
0	Frase estruturada	$'\alpha'$ possui um símbolo não-terminal
1	Sensível ao contexto	$'\alpha'$ possui um símbolo não-terminal e o comprimento de $'\alpha'$ é menor ou igual ao de $'\beta'$
2	Livre de contexto	$'\alpha'$ é um único terminal
3	Regular	as produções são da forma $\alpha \rightarrow a\beta$, $\alpha \rightarrow \beta a$ ou $\alpha \rightarrow a$, onde $'\alpha'$ e $'\beta'$ são símbolos não-terminais únicos e $'a'$ é um símbolo terminal ou $'\lambda'$

3.2 Inferência gramatical

Inferência gramatical é o processo de obter uma gramática que represente uma dada linguagem, com recurso à análise de um conjunto de dados empíricos. Dado um conjunto finito de exemplos

(*strings*), é possível identificar a gramática que rege a linguagem. Com a gramática definida, é então possível analisar outras *strings*, por forma a determinar se essas *strings* pertencem ou não à linguagem definida pela gramática: caso a *string* seja reconhecida pela gramática, então pertence à linguagem; se a *string* não é reconhecida pela gramática, significa que a *string* não faz parte da linguagem. Alternativamente a gramática pode ter sido mal inferida e, não reconhecendo a *string* não implica que a mesma não pertença à linguagem.

O conceito de identificação no limite, apresentado por Gold[20], é o ponto de partida para a percepção de inferência gramatical, e baseia-se no facto de ser possível o fornecimento de uma sequência de informação completa $I(L(G))$ a um dado algoritmo de inferência. Considerando G uma dada gramática e L a linguagem gerada - $L(G)$, partindo do princípio de que é possível obter uma sequência de informação completa para o algoritmo de inferência, então $I(L(G))$ é uma representação de todas as sequências de $L(G)$ (informação positiva) e de $\Sigma^* - L(G)$ (informação negativa).

Uma classe de linguagens é considerada “identificada no limite” se existir um algoritmo de inferência para qualquer gramática $G \in C$ e para qualquer sequência $I(L(G))$ completa, se existir um τ tal que:

$$\begin{aligned} G_t &= G_\tau \quad \forall t \succ \tau \\ L(G_t) &= L(G_\tau) \end{aligned}$$

onde G é o resultado do algoritmo, usando as primeiras palavras da informação obtida de $I(L(G))$.

O exemplo seguinte apresenta algumas características importantes de um algoritmo de inferência, tal como a quantidade e qualidade dos dados usados pelo algoritmo. Verifica-se que, o mesmo conjunto de dados é possível ser gerado por diferentes gramáticas. Considerando a gramática (3.5), pode obter-se a sequência de informação J (3.7)

$$G = \{S \rightarrow aS|aA, A \rightarrow bA|b\} \quad (3.5)$$

produzindo a linguagem (3.6):

$$L(G) = \{a^n b^m \mid n \geq 1, m \geq 1\} \quad (3.6)$$

$$J = \{aab, aaab, aabbb\} \quad (3.7)$$

Considere-se que apenas se dispõe de J como uma sequência a ser usada por um dado algoritmo de inferência, a fim de encontrar a gramática G , tal que $J \subset L(G)$. Pode existir assim, um problema de inferência. Ao executar o algoritmo de inferência com a sequência de dados J , o mesmo pode inferir a gramática G' (3.8), responsável pela obtenção da linguagem (3.9).

$$G' = \{S \rightarrow aA, A \rightarrow aB, B \rightarrow aC|bD|b, C \rightarrow bD|b, D \rightarrow bE, E \rightarrow bD|b\} \quad (3.8)$$

$$L(G') = \{a^n b^{2p+1} \mid n = 2 \vee 3, p \geq 0\} \quad (3.9)$$

Se a sequência J contiver mais dados, é então possível que o algoritmo de inferência apenas infira a gramática G . Para todos os efeitos, esta situação não deve ser considerada um erro, mas, sim, uma característica a considerar, pois ambas as gramáticas geram a sequência J . Cabe ao utilizador o uso de dados com qualidade e quantidade suficientes para o caso em estudo.

“A eficiência de um algoritmo de inferência encontra-se dependente da relação entre o número de exemplos disponíveis e o tamanho da gramática a inferir. O número de exemplos, na forma de conjunto

de palavras, corresponde ao comprimento dessas palavras. O tamanho da gramática a inferir pode ser assumido como o número de produções inferidas. Notar que um elevado número de palavras exemplo pode ser de fraca qualidade pelo facto de estas serem todas semelhantes, fazendo uso essencialmente das mesmas produções”[21].

3.2.1 Inferência e DFA/NFA

Os algoritmos de inferência gramatical e máquinas de estados estão amplamente interligados, isto porque, após a construção da gramática, é necessária uma ferramenta que implementando a gramática permita, por exemplo, a identificação de uma *string* numa dada linguagem.

Entende-se como máquina de estados uma entidade constituída por um conjunto de estados, transições e entradas, modelando, assim, um determinado comportamento. Para cada estado, existe uma ou mais entradas, que originam uma transição para o próximo estado. A máquina de estados pode ter um estado inicial e outro final, que, como se percebe, são os estados onde a máquina começa e termina a sua evolução dinâmica. Com esta ferramenta, é possível modelar o conjunto de produções da gramática e, assim obter a máquina de estados que pode verificar se uma dada *string* proposta pertence à linguagem gerada por essa gramática. Neste documento optou-se por utilizar os símbolos apresentados na figura 3.1, para representar graficamente máquinas de estado.

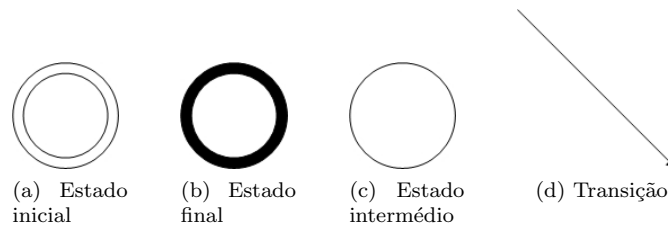


Figura 3.1: Simbologia para a representação gráfica de uma máquina de estados

Como exemplo, na figura 3.2, apresenta-se a máquina de estados referente à gramática G apresentada em (3.5), onde q_0 , q_1 e q_2 representam os estados que são usados pela máquina, que em conjunto com a entrada vão modelar o comportamento da gramática.

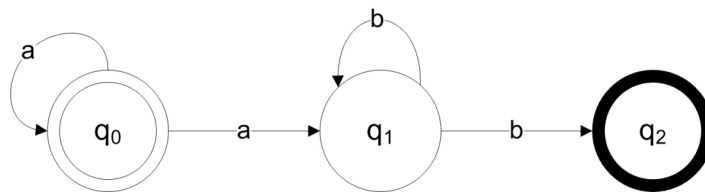


Figura 3.2: Máquina de estados da gramática (3.5)

Na família de máquinas de estado, existem máquinas determinísticas (DFA) e não-determinísticas (NFA). Nos DFA, para cada par (estado, entrada), existe uma e só uma transição, enquanto que nos NFA o par (estado, entrada) pode ter mais transições. Um DFA é constituído pelo 5-tuplo $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ [22], onde:

- Q é um número finito de estados;
- Σ um conjunto finito de entradas;
- δ a função de transição, que define a próxima transição para um dado estado e entrada, $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$;

- q_0 o estado de início, tal que $q_0 \in Q$;
- F é o conjunto de estados finais, onde $F \subseteq Q$.

Um NFA é constituído pelo mesmo tipo de 5-tuplo, mas a função transição δ tem a capacidade de, para um dado par (estado, entrada), resultar em zero, um ou mais estados: Existem assim três tipos possíveis de transição:

- Inexistência de transição, não existe uma transição de estado aquando a ocorrência de uma entrada;
- Uma entrada num estado resulta numa única transição, tal como nos DFA;
- O estado com uma dada entrada origina duas ou mais transições para diferentes estados.

Desta forma, define-se função transição como $\delta : Q \times S \rightarrow P(Q)$, onde δ vai mapear o estado com uma entrada, resultando num conjunto de partes¹ $P(Q)$, ou seja, vai retornar um estado que pertence ao conjunto de partes de Q .

Na figura 3.3, apresenta-se um exemplo dos dois tipos de máquinas de estados. No DFA, verifica-se que, para cada transição, existe apenas um par (estado, entrada). No NFA, a mesma transição pode ocorrer na sequência de diferentes pares (estado, entrada). De forma a simplificar a leitura desta dissertação, a designação de autómato é usada para referir a utilização de máquinas de estado no seu reconhecimento de linguagens ou gramáticas.

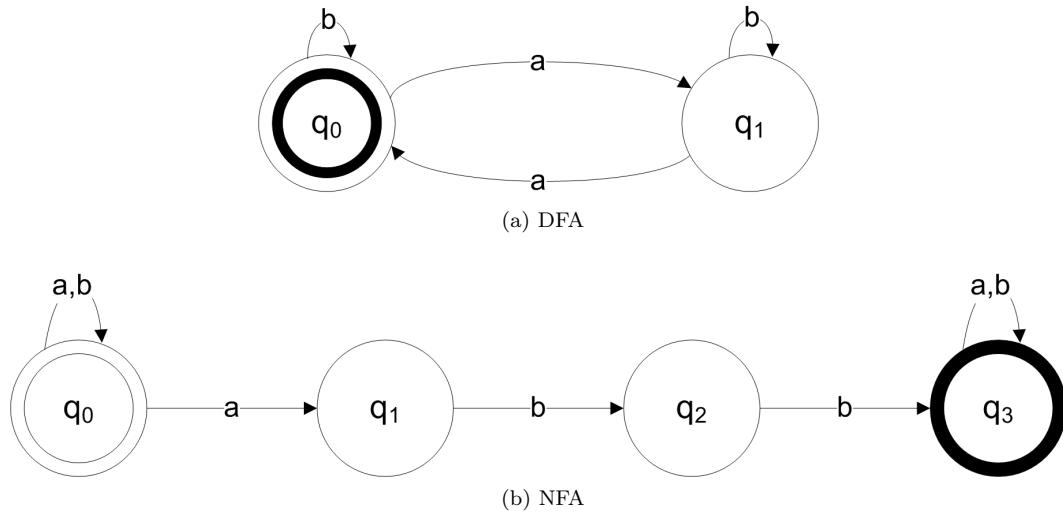


Figura 3.3: Diagramas de máquinas de estados determinística e não-determinística

3.2.2 Expressão regular

Como foi referido, é possível utilizar máquinas de estados para verificar a que linguagem pertence uma dada *string*. Também se referiu que um conjunto de *strings* pode ser formalmente representado pelas produções da gramática ou pela linguagem, como é visível em (3.5) e (3.6). No entanto, é interessante ao nível da análise, a possibilidade de representar um conjunto de dados pertencentes à mesma linguagem de forma algébrica. O uso de expressões regulares possibilita que se possa construir uma expressão algébrica que defina um conjunto de dados pertencentes à mesma linguagem regular.

¹Conjunto de partes, representado por $P(Z)$, é o conjunto de todos os subconjuntos de Z , incluindo o vazio e o próprio, e.g.: Se $Z = \{a, b, c\} \Rightarrow P(Z) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}\}$.

A definição e propriedades das expressões regulares são apresentadas em [22] e reproduzidas de seguida, onde para melhor compreensão, os símbolos das expressões regulares são apresentados a negrito:

Considerando o conjunto de alfabetos $S = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ e \mathbf{r} uma expressão regular definida por Σ , onde a linguagem gerada por \mathbf{r} é $L(\mathbf{r})$, Tem-se que:

1. $\mathbf{a_i}$ é uma expressão regular correspondendo ao símbolo $a_i \in \Sigma, \forall i = 1 : n$, a linguagem gerada por $\mathbf{a_i} \rightarrow L(\mathbf{a_i})$ é:

$$L(\mathbf{a_i}) = \{a_i\}, \forall i = 1 : n$$

2. ϵ é o símbolo de expressão regular da *string* nula, a linguagem gerada é $L(\epsilon)$:

$$L(\epsilon) = \{\epsilon\}$$

3. Φ é o símbolo de expressão regular na situação da não existência de símbolos de entrada, a sua linguagem é $L(\Phi)$:

$$L(\Phi) = \Phi$$

4. Se $\mathbf{r_1}$ e $\mathbf{r_2}$ são duas expressões regulares, $(+)$ o operador união, $L(\mathbf{r_1})$ e $L(\mathbf{r_2})$ as linguagens correspondentes, então $(\mathbf{r_1} + \mathbf{r_2})$ será também uma expressão regular com a linguagem resultante de $L(\mathbf{r_1}) \cup L(\mathbf{r_2})$. Chama-se a esta operação a propriedade da adição das expressões regulares.
5. Se $\mathbf{r_1}$ e $\mathbf{r_2}$ são duas expressões regulares, $(.)$ o operador concatenação, $L(\mathbf{r_1})$ e $L(\mathbf{r_2})$ as linguagens correspondentes, então $(\mathbf{r_1.r_2})$ será também uma expressão regular com a linguagem resultante de $L(\mathbf{r_1}).L(\mathbf{r_2})$. Chama-se a esta operação a propriedade da concatenação das expressões regulares.
6. Se \mathbf{r} é uma expressão regular, $(*)$ representa a estrela de Kleene e $L(\mathbf{r})$ a linguagem correspondente, então $\mathbf{r^*}$ é também uma expressão regular que pode gerar $L(\mathbf{r^*})$ ou $L(\mathbf{r})^*$. A esta propriedade dá-se o nome de fecho de Kleene. Por exemplo, se a expressão regular \mathbf{a} gera $L(\mathbf{a})$, temos $L(\mathbf{a}) = \{a\}$, então $L(\mathbf{a})^* = \{\epsilon, a, aa, aaa, aaaa, \dots, \infty\}$.

O uso da estrela de Kleene indica a existência de zero ou mais símbolos. Existe ainda uma forma extendida de representar expressões regulares, em que é possível usar alguns operadores tais como $(?)$, que tem um significado semelhante à estrela de Kleene, mas indicando a existência de zero ou um elemento, e ainda $(+)$, e.g.: $\mathbf{r^+}$ que indica a existência de um ou mais elementos. Pode ainda substituir-se $(\mathbf{r_1} + \mathbf{r_2})$ por $(\mathbf{r_1|r_2})$.

Para melhor compreensão, apresenta-se de seguida alguns exemplos das propriedades de representação de expressões regulares:

- $L(\mathbf{a}) = \{a\}, L(\mathbf{b}) = \{b\} \rightarrow L(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = L(\mathbf{a}) \cup L(\mathbf{b}) = \{a, b\}$
- $L(\mathbf{a}) = \{a\}, L(\mathbf{b}) = \{b\} \rightarrow L(\mathbf{a.b}) = L(\mathbf{a}).L(\mathbf{b}) = \{ab\}$
- $\mathbf{r_1} = \mathbf{a}$ e $\mathbf{r_2} = \mathbf{b^*} \therefore L(\mathbf{r_1}) = \{a\}$ e $L(\mathbf{r_2}) = \{\epsilon, b, bb, bbb, \dots, \infty\}$, então

$$L(\mathbf{r_1.r_2}) = L(\mathbf{r_1}).L(\mathbf{r_2}) = \{a, ab, abb, abbb, \dots, \infty\}$$

- $\mathbf{r_1} = \mathbf{a}$ e $\mathbf{r_2} = \mathbf{b^*} \therefore L(\mathbf{r_1}) = \{a\}$ e $L(\mathbf{r_2}) = \{\epsilon, b, bb, bbb, \dots, \infty\}$, então

$$L(\mathbf{r_1} + \mathbf{r_2}) = L(\mathbf{r_1}) \cup L(\mathbf{r_2}) = \{\epsilon, a, b, bb, bbb, \dots, \infty\}$$

- $\mathbf{r} = (\mathbf{a} + \mathbf{b})$, então $\mathbf{r}^* = (\mathbf{a} + \mathbf{b})^* \Rightarrow L(\mathbf{r}^*) = L(\mathbf{r})^* = \{\epsilon, a, b, aa, ab, ba, bb, aaa, \dots, \infty\}$

- $\mathbf{r}_1 = \mathbf{a}$ e $\mathbf{r}_2 = \mathbf{b}^+ \therefore L(\mathbf{r}_1) = \{a\}$ e $L(\mathbf{r}_2) = \{b, bb, bbb, \dots, \infty\}$, então

$$L(\mathbf{r}_1.\mathbf{r}_2) = L(\mathbf{r}_1).L(\mathbf{r}_2) = \{ab, abb, abbb, \dots, \infty\}$$

- $\mathbf{r}_1 = \mathbf{a}$ e $\mathbf{r}_2 = \mathbf{b}^+ \therefore L(\mathbf{r}_1) = \{a\}$ e $L(\mathbf{r}_2) = \{b, bb, bbb, \dots, \infty\}$, então

$$L(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2) = L(\mathbf{r}_1) \cup L(\mathbf{r}_2) = \{a, b, bb, bbb, \dots, \infty\}$$

- $\mathbf{r} = (\mathbf{a} + \mathbf{b})$, então $\mathbf{r}^+ = (\mathbf{a} + \mathbf{b})^+ \Rightarrow L(\mathbf{r}^+) = L(\mathbf{r})^+ = \{a, b, aa, ab, ba, bb, aaa, \dots, \infty\}$

- $\mathbf{r}_1 = \mathbf{a}$ e $\mathbf{r}_2 = \mathbf{b}^? \therefore L(\mathbf{r}_1) = \{a\}$ e $L(\mathbf{r}_2) = \{\epsilon, b\}$, então

$$L(\mathbf{r}_1.\mathbf{r}_2) = L(\mathbf{r}_1).L(\mathbf{r}_2) = \{a, ab\}$$

- $\mathbf{r}_1 = \mathbf{a}$ e $\mathbf{r}_2 = \mathbf{b}^? \therefore L(\mathbf{r}_1) = \{a\}$ e $L(\mathbf{r}_2) = \{\epsilon, b\}$, então

$$L(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2) = L(\mathbf{r}_1) \cup L(\mathbf{r}_2) = \{\epsilon, a, b\}$$

- $\mathbf{r} = (\mathbf{a} + \mathbf{b})$, então $\mathbf{r}^? = (\mathbf{a} + \mathbf{b})^? \Rightarrow L(\mathbf{r}^?) = L(\mathbf{r})^? = \{\epsilon, a, b\}$

3.2.3 Aprendizagem

A aprendizagem no contexto computacional é referente à programação de uma dada máquina, a fim de otimizar a sua eficiência na resolução de problemas. Geralmente, esta aprendizagem baseia-se em exemplos de treino e experiência de situações anteriores. A razão de ser da utilização de aprendizagem está directamente ligada ao facto de uma situação ser demasiado complexa e difícil de ser modelada e implementada. Por vezes, não é possível explicar em detalhe o processo subjacente ao problema. No entanto, admite-se que pode existir um processo ou padrão que explica os dados observados.

Um dos objectivos da aprendizagem é esta possibilitar o reconhecimento de situações novas, usando a base dos exemplos de treino. Esta característica pode ser difícil de atingir, visto que, para a generalidade dos sistemas, é quase impossível efectuar o treino com todas as situações possíveis. Apesar de o uso de exemplos de treino poder apenas resultar numa aproximação do problema, esta aproximação pode ser suficiente para a resolução de parte do problema, sendo esta parte aquela que realmente interessa resolver.

Um domínio de aplicação onde a aprendizagem tem um papel importante é o reconhecimento de padrões. O reconhecimento óptico de letras manuscritas, onde criar uma descrição que englobe tudo o que é a letra “A” e o que não o é, considerando ainda a existência de diferentes estilos de “A”, com distintos tamanhos e escritos com materiais diferentes, não é trivial. Assim, o uso de algoritmos de aprendizagem que, através da análise de vários “A”s se, retirem as características comuns a todos eles, construindo a descrição do que é a letra “A”. Esta descrição pode ser utilizada para a identificação de novos “A”s que não estavam incluídos nos exemplos de treino.

Esta situação é bastante semelhante ao problema da análise da qualidade de energia. Através de um conjunto de dados utilizados na aprendizagem, obtêm-se os padrões de cada perturbação. No entanto, cada situação é sempre um pouco diferente da anterior. Assim, a partir dos padrões aprendidos os algoritmos de reconhecimento têm de ser capazes de obter resultados positivos em situações que não são exactamente iguais às do treino.

3.2.3.1 Obtenção da amostra (palavra)

Um primeiro passo para inferir sobre uma amostra é obter essa amostra. É nesta situação que o alfabeto usado é relevante, sendo necessária a sua criação de forma apropriada ao caso em estudo. Esse alfabeto será usado para transformar um sinal amostrado numa palavra que o represente. Usando como exemplo a situação de análise de um electrocardiograma (ECG) apresentada em [23], é possível pensar num alfabeto em que por exemplo, é usada a quantização do sinal para obter os símbolos. O sinal, seria modelado pelos diferentes valores de quantização. Na figura 3.4, apresenta-se esta situação, em que a palavra correspondente ao sinal é: *BBCDECCBBBBBBDAAPBBBCDDBBBBB*. Esta palavra torna a compreensão do sinal complexa e dificulta a detecção dos padrões na mesma.

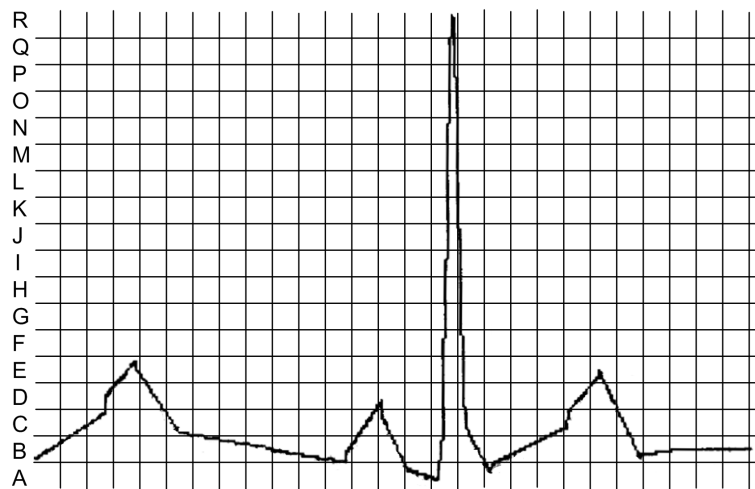


Figura 3.4: Secção de um ECG, amostrado usando um alfabeto de quantização

De forma, a melhorar a compreensão da *string* obtida, é necessário o uso de outro alfabeto, um que seja mais apropriado para a situação em estudo; assim é apresentado em [23] um alfabeto diferente, que demonstra ter uma maior capacidade de síntese para a análise de um ECG. Tabela 3.2, Δ é um valor mínimo estipulado inicialmente.

Tabela 3.2: Alfabeto usado na análise do ECG, adaptado de [23]

Nome da primitiva	Símbolo	Descrição
Horizontal	h	Segmento com valor constante
Subida	u	Segmento com inclinação positiva $< \Delta$
Descida	d	Segmento com inclinação negativa $> -\Delta$
Subida muito inclinada	U	Segmento com inclinação positiva $\geq \Delta$
Descida muito inclinada	D	Segmento com inclinação negativa $\leq -\Delta$

Assim, o sinal apresentado na figura 3.5 pode ser amostrado tal como é apresentado, obtendo-se uma palavra que pode ser analisada. Neste caso, obtém-se a seguinte palavra: *uuddhuddUUUuDDDduuduh*. Entende-se que a escolha do alfabeto a usar necessita de ser apropriada ao caso em estudo, a fim de contribuir para a sua simplificação e não o contrário.

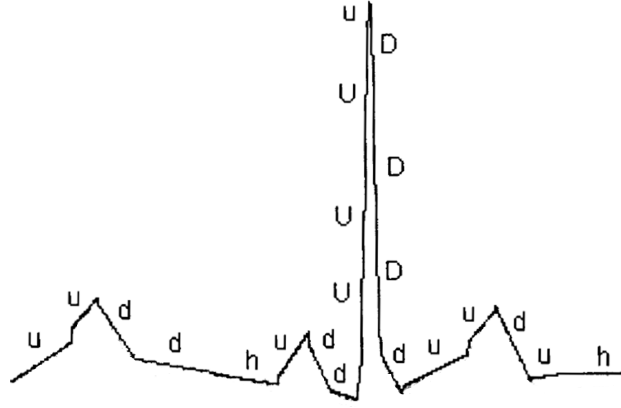


Figura 3.5: Secção de um ECG, usando o alfabeto definido em [23]

3.2.3.2 Inferir a gramática

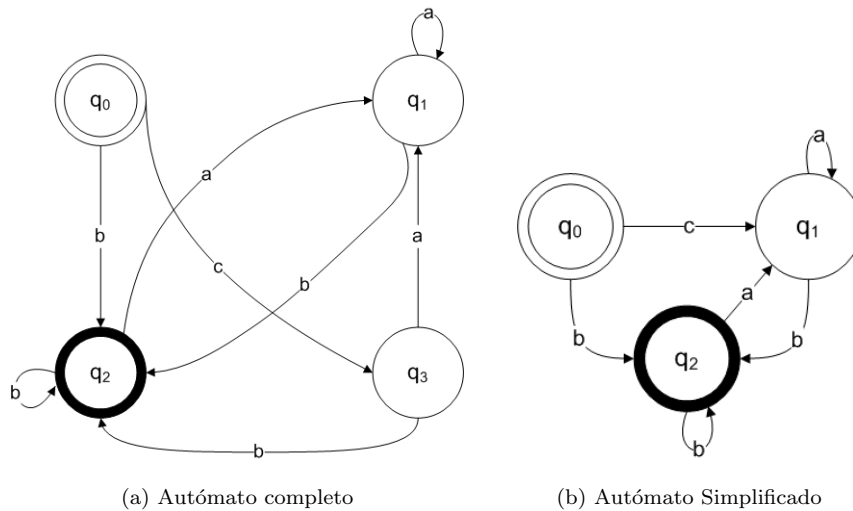
Como foi explicado na subsecção 3.2.1, o uso de máquinas de estados (gramática) permite analisar uma dada *string*. Numa situação prática, não é dada a máquina de estados e, portanto, é necessária a sua inferência. A escolha do método de inferência não é trivial, pois depende muito dos dados práticos disponíveis. Como tal existem variados métodos, em que a ênfase está na aprendizagem através de exemplos. Neste caso, apenas se consideram dois métodos explicados por Laurent Miclet em [24], o método do sucessor e o algoritmo uv^kw , que são os que melhor se encaixam nas necessidades desta dissertação.

No primeiro método, para cada símbolo, é criado um estado e é feita uma ligação ao símbolo que ocorrer em seguida. Considerando a amostra $I' = (caab, bbaab, caab, bbab, cab, bbb, cb)$ e analisando I' , retiram-se as seguintes conclusões:

Sucessor de λ : $(c, b) \rightarrow Q_0$ Sucessor de b : $(a,) \rightarrow Q_2$

Sucessor de a : $(a, b) \rightarrow Q_1$ Sucessor de c : $(a, b) \rightarrow Q_3$

Assim, todas as palavras começam com os símbolos (c, b) , resultando em Q_0 ; da mesma forma, após um a , encontra-se outro a ou b , resultando em Q_1 ; seguindo a mesma linha de raciocínio, obtém-se Q_2 e Q_3 , resultando no autómato apresentado na figura 3.6.

Figura 3.6: Autómato resultantes da análise de I'

A simplificação apresentada na figura 3.6b deve-se ao facto de os estados originais 1 e 3 terem os mesmos sucessores. Através do resultado obtido, é possível verificar se uma nova *string* fará parte da linguagem da qual I' é uma amostra.

No segundo método, o fundamento está em procurar pedaços da *string* que denunciem recursividade, definindo assim a gramática usada. Partindo deste princípio, e no caso de a gramática ser regular, é possível aplicar a teoria subjacente ao *pumping lemma*, que, de uma forma simples, define que numa *string* suficientemente longa, pertencente a uma gramática regular, um pedaço dessa *string* pode ser repetido n vezes, originando uma nova palavra, mas fazendo parte da mesma linguagem que a palavra original. O algoritmo procura pedaços da *string* que estejam repetidos de forma contígua. Quando os encontra e assumindo que a sua repetição se deveu a passagens sucessivas na mesma parte do autómato correspondente, substitui a repetição, regendo-se pelos formalismos das expressões regulares. Este processo é aplicado recursivamente, até resultar numa expressão regular final que representa a gramática inferida a partir dos exemplos. Para melhor compreensão considere-se o seguinte exemplo.

Considere-se a amostra $I_2 = (x_1, x_2, x_3)$, onde

$$x_1 = aabaaababcabc \quad x_2 = abcabaabcbcb \quad x_3 = aaaaabc$$

Analisando as repetições contíguas de símbolos ou conjuntos de símbolos em cada amostra:

$$x_1 = (a)^2baaababcabc$$

$$x_1 = aab(a)^3babcbabc$$

$$x_1 = aabaa(ab)^2cbabc$$

$$x_1 = aabaaab(abc)^2$$

$$x_2 = abcab(a)^2bcbcb$$

$$x_2 = abcabaa(bc)^2$$

$$x_3 = (a)^5bc$$

Obtêm-se como possíveis repetições: a, ab, abc, bc

Das quatro repetições possíveis, escolhe-se a hipótese a , sendo a repetição com maior ocorrência.

Reescreve-se $z = a^+$ e obtém-se:

$$x_1 = zbzbbzbczbc$$

$$x_2 = zbczbbzbczbc$$

$$x_3 = zbc$$

Analisando da mesma forma que anteriormente:

$$x_1 = (zb)^3czbc$$

$$x_1 = zbzbb(zbc)^2$$

$$x_2 = zbc(zb)^2cbcb$$

$$x_2 = zbczbbz(bc)^2$$

Obtêm-se como possíveis repetições: zb, bc, zbc

Escolhe-se a hipótese zb , seguindo o mesmo raciocínio anterior. Reescreve-se $y = (zb)^+$ e obtém-se:

$$x_1 = ycyc$$

$$x_2 = ycyczbc$$

$$x_3 = yc$$

Analisando as amostras, verifica-se que a única possibilidade é yc . Substituindo $x = (yc)^+$ obtém-se:

$$x_1 = x$$

$$x_2 = xbc$$

$$x_3 = x$$

Finalmente, a expressão regular final é inferida a partir dos dados. Unindo x_1 , x_2 e x_3 , e de seguida, aplicando as substituições de forma inversa:

$$x + xbc = ((a^+b)^+c) + ((a^+b)^+c)^+bc$$

À anterior expressão regular corresponde o autómato não-determinístico apresentado na figura 3.7.

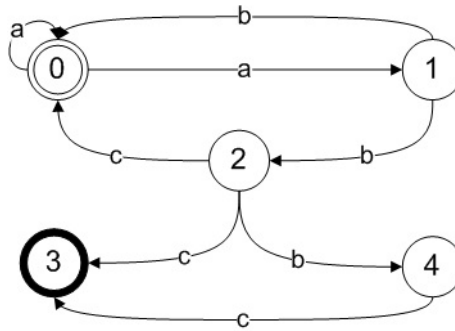


Figura 3.7: Autómato inferido apartir do conjunto I_2

Após a dedução das expressões regulares (graficamente representadas por autómatos), ficam calculadas as produções da gramática inferida.

Capítulo 4

Inferência gramatical de eventos da qualidade de energia

O método de análise da qualidade de energia desenvolvido, como já foi explicado, usa as capacidades de reconhecimento de padrões inerentes às gramáticas. Para usar essas gramáticas, antes de mais, é necessário inferi-las. Desta forma, o método de aprendizagem é composto por 3 partes: aquisição da amostra, em que é feita a amostragem do sinal da rede eléctrica; processamento do sinal, transformando o sinal recolhido em palavras compostas pelo alfabeto definido; inferência da gramática, calculando os padrões existentes nos dados e obtendo as produções para cada situação. A figura 4.1 apresenta, de forma gráfica, o método de aprendizagem considerado.

Todo o método foi desenvolvido em *software* Matlab (r2009b), recorrendo ao seu sistema de *script*.

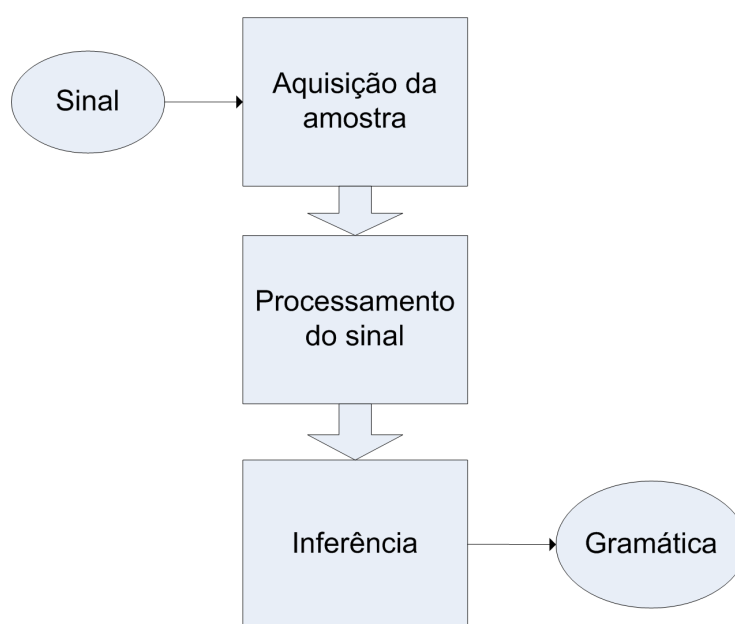


Figura 4.1: Esquema do método de aprendizagem

4.1 Perturbações de um sistema trifásico: sinal e aquisição da amostra

Como foi explicado na subsecção 3.2.3, são necessárias amostras exemplo para inferir as gramáticas. Neste caso, as amostras consideradas são diferentes perturbações do mesmo tipo de evento, para se inferir a gramática que caracteriza esse tipo de distúrbio.

Para isso foram criados diferentes sinais que simulam as perturbações, seguindo as indicações normalizadas, apresentadas em [16]. Considerou-se a rede eléctrica portuguesa de baixa tensão, com uma frequência de 50Hz, uma tensão eficaz composta de 400V e uma tensão eficaz simples de 230V.

Cada uma das tensões da rede não perturbadas pode ser representada por (4.1):

$$v(t) = V_{offset} + V_{max} * \sin(\omega t + \phi) \quad (4.1)$$

onde:

- $v(t)$ é a função no domínio do tempo;
- V_{offset} é o valor de desvio em relação a zero, considerado como nulo;
- V_{max} é a amplitude máxima da tensão ($V_{max} = \sqrt{2} * V_{ef}$);
- ω representa a frequência angular (rad/s);
- t é o tempo em segundos;
- ϕ representa o ângulo de fase inicial;
- $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência em Hertz.

De seguida, apresenta-se a metodologia utilizada para a geração de eventos anómalos, sendo eles: distorção harmónica, flutuações da tensão, interrupção e desequilíbrio de tensões, cavas de tensão e sobretensão. Foram consideradas quatro situações diferentes para cada tipo de perturbação. Em todas as situações, foram usados valores em conformidade com a norma europeia [16].

4.1.1 Distorção harmónica

O algoritmo de aprendizagem necessita de várias *strings* para poder inferir a respectiva gramática. Assim escolheram-se quatro ordens para as harmónicas. Na tabela 4.1, apresentam-se as ordens escolhidas, valores limites e valores usados na geração de padrões (valores percentuais relativos à tensão estipulada). Os valores usados são ligeiramente superiores aos valores mínimos, de forma a não se trabalhar na zona limite.

Tabela 4.1: Ordens e valores simulados

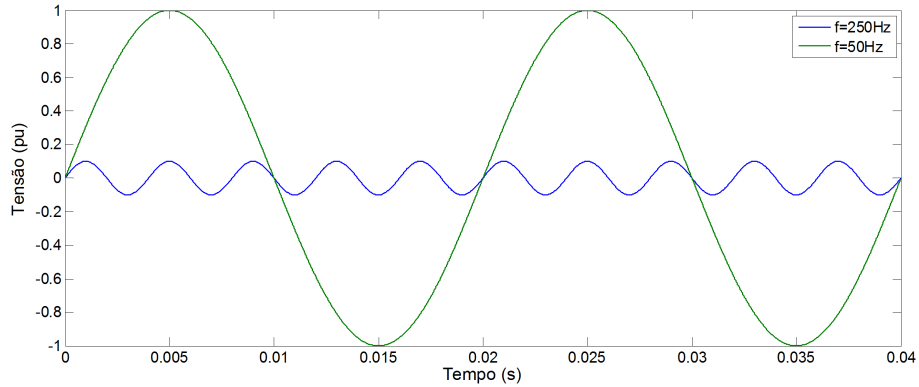
Ordem	Valor mínimo	Valor usado
2ª	2%	4%
3ª	5%	7%
5ª	6%	8%
7ª	5%	7%

Para gerar um sinal anómalo, é necessário somar um sinal com a frequência fundamental e um sinal com a frequência múltipla, obtendo, assim, um novo sinal que está afectado pela presença da harmónica em causa:

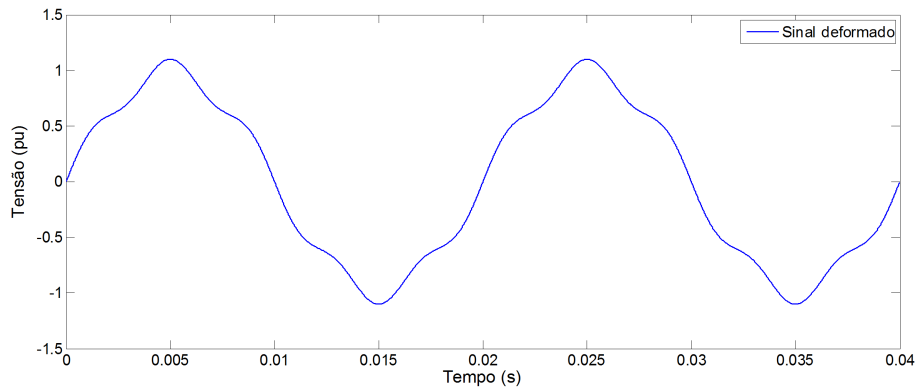
$$v(t) = V_{max} * \sin(\omega t + \phi) \quad v(t)_h = V_h * \sin(N\omega t + \phi_h) \quad (4.2)$$

onde N é a ordem da harmónica.

Na figura 4.2 apresenta-se como exemplo uma perturbação com uma harmónica de ordem 5 (250 Hz).



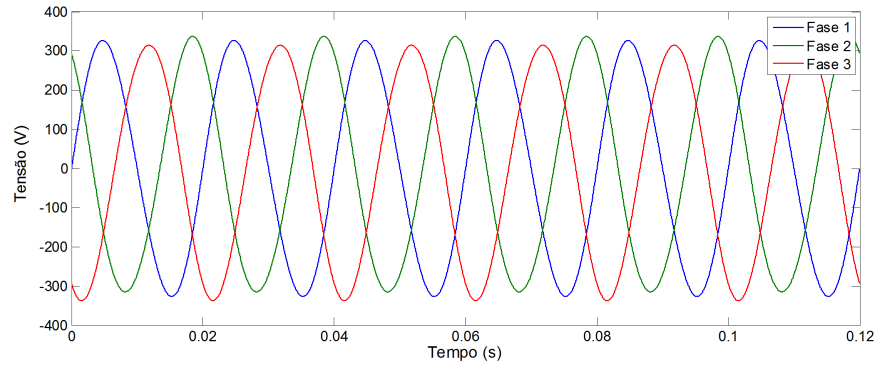
(a) Sinal de frequência fundamental e a respectiva harmónica de 5ª ordem



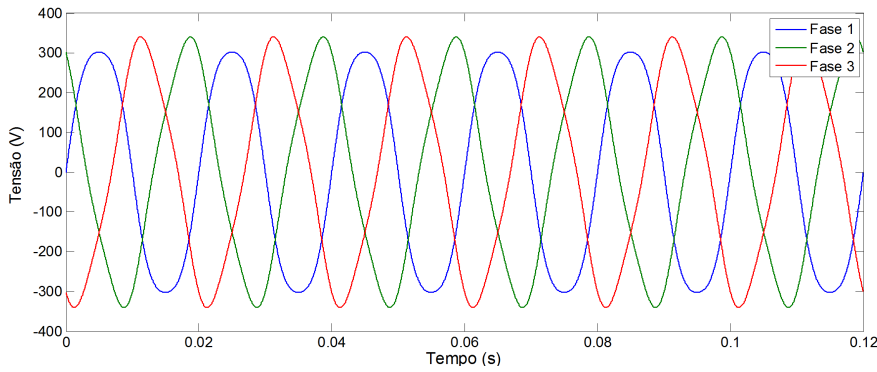
(b) Sinal resultante da adição

Figura 4.2: Representação de uma perturbação harmónica

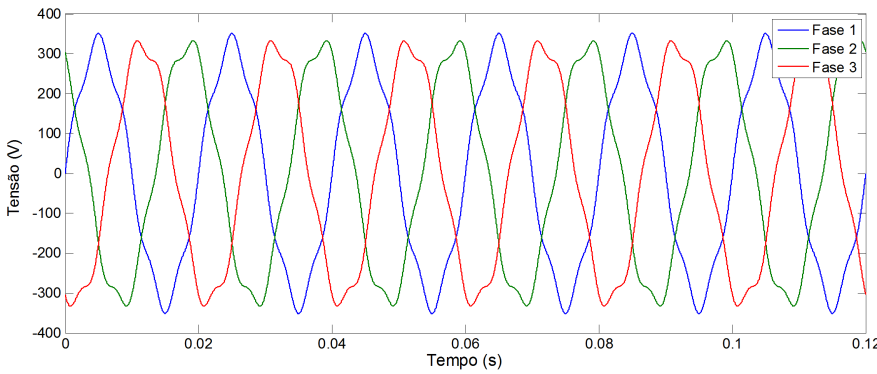
Seguindo o mesmo raciocínio para os quatro exemplos considerados, obtêm-se os seguintes sinais apresentados na figura 4.3, considerando uma rede trifásica:



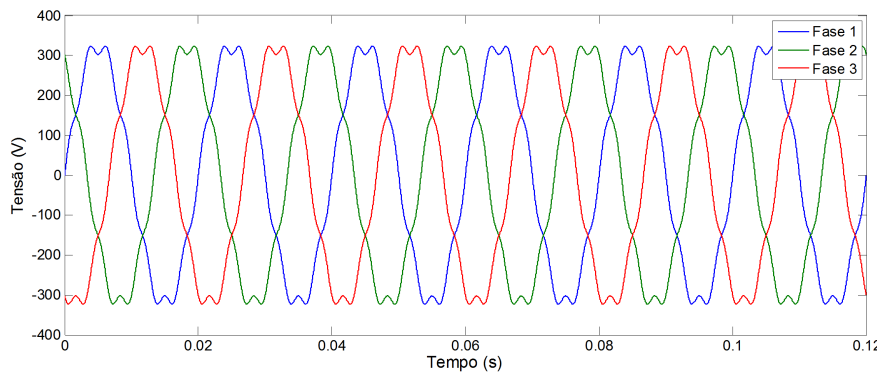
(a) Tensão trifásica com presença de harmônicas de 2ª ordem



(b) Tensão trifásica com presença de harmônicas de 3ª ordem



(c) Tensão trifásica com presença de harmônicas de 5ª ordem



(d) Tensão trifásica com presença de harmônicas de 7ª ordem

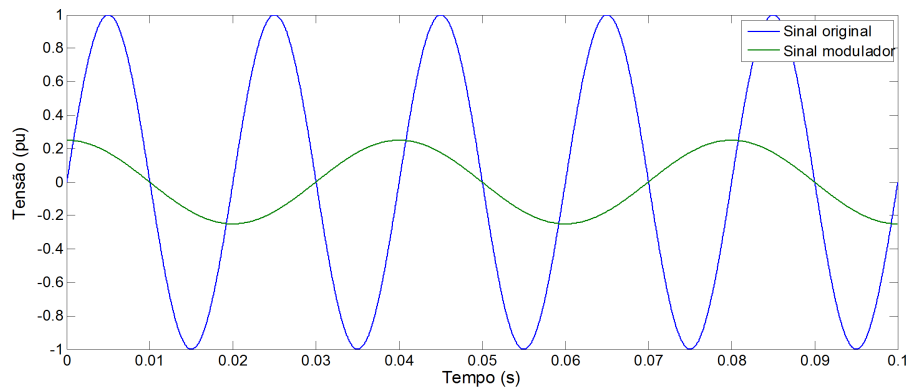
Figura 4.3: Exemplos utilizados na aprendizagem da ocorrência de harmônicas

4.1.2 Flutuações de tensão

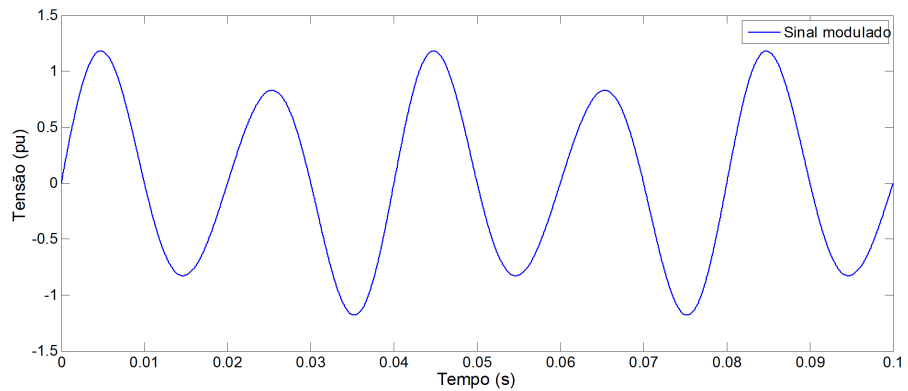
Como foi explicado no capítulo 2, este evento caracteriza-se por pequenas variações cíclicas da amplitude da tensão. Usando modulação de amplitude, é possível obter esse efeito cíclico. Em (4.3) apresentam-se as seguintes expressões matemáticas representativas dos sinais utilizados, com as respectivas variações para cada fase (ϕ).

$$\begin{aligned}
 v(t)_{flu1} &= (V_{max} - V * \cos(\frac{\phi}{2}t)) * \sin(\omega t) \\
 v(t)_{flu2} &= (V_{max} - V * \cos(\frac{\phi}{3}t)) * \sin(\omega t) \\
 v(t)_{flu3} &= (V_{max} + V * \cos(\frac{\phi}{2}t)) * \sin(\omega t) \\
 v(t)_{flu4} &= (V_{max} + V * \cos(\frac{\phi}{3}t)) * \sin(\omega t)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

A figura 4.4 mostra, em forma de exemplo, dois sinais separados e o resultado da modulação em amplitude de um pelo outro.



(a) Sinais separados



(b) Sinal resultante

Figura 4.4: Modulação de amplitude simulando flutuações de tensão

Desta forma os quatro sinais usados pelo algoritmo de aprendizagem, apresentam-se na figura 4.5.

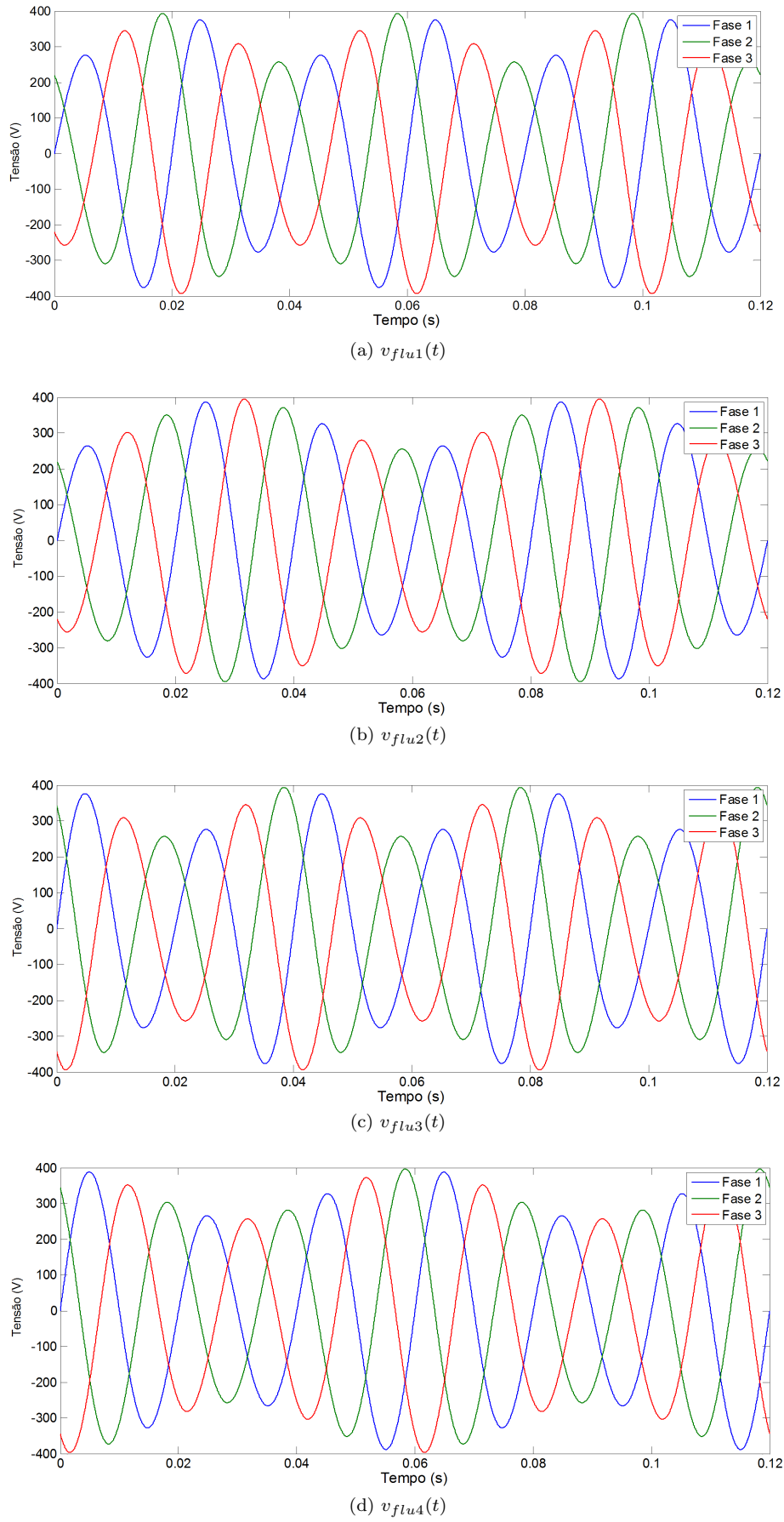


Figura 4.5: Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de flutuações de tensão

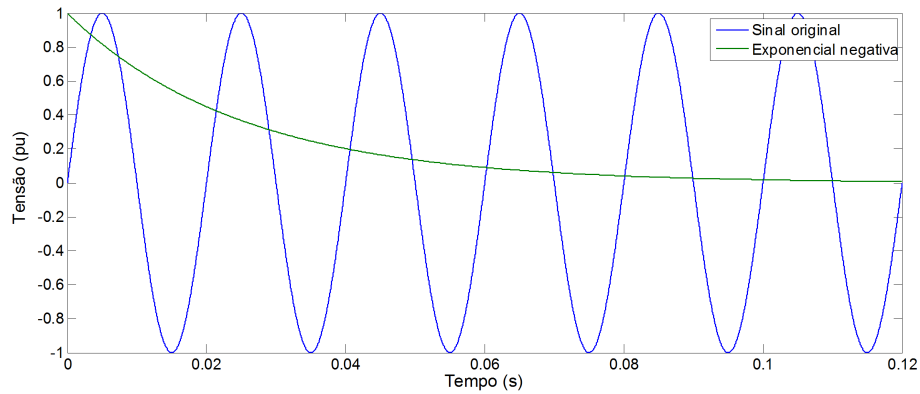
4.1.3 Interrupção

O comportamento de uma interrupção pode ser apresentado como uma sinusóide que é modulada por uma função exponencial negativa. Dependendo da severidade da ocorrência, a taxa de decrescimento r é variável; sendo que a forma de simular este comportamento é através da alteração dos parâmetros da exponencial.

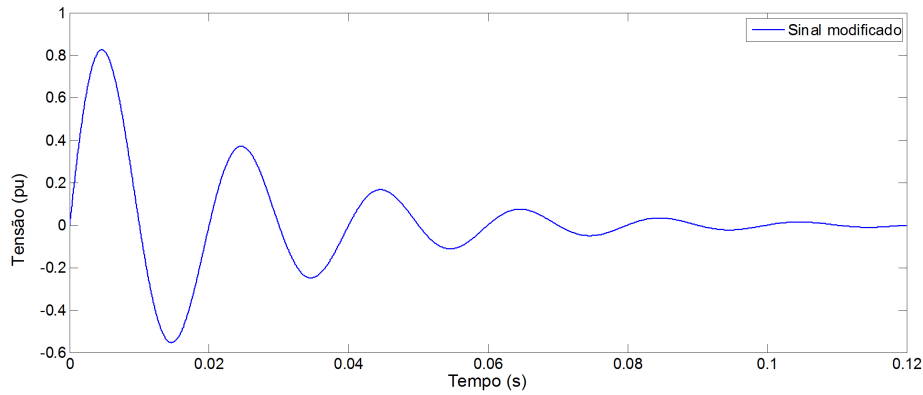
Na equação (4.4), apresenta-se esta perturbação.

$$v(t)_{int} = v(t) * \exp(-\alpha t) \quad (4.4)$$

A figura 4.6 apresenta o sinal inalterado e a exponencial negativa que o vai modificar, bem como o sinal resultante.



(a) Sinal original e a exponencial que vai modular a sua amplitude



(b) Sinal resultante

Figura 4.6: Uso da exponencial negativa para simulação de uma interrupção

Na produção dos quatro exemplos de aprendizagem, alterou-se, para cada um, o valor do expoente da exponencial. Assim consegue-se obter diferentes amostras com diferentes tempos de descida, até ao valor abaixo de 0,01 pu, tal como estipulado pela norma, obtendo, desta forma, exemplos mais abrangentes, dentro do conceito de interrupção. Usou-se os seguintes valores para α : (40, 50, 60, 70), respectivamente. Esses resultados são apresentados na figura 4.7.

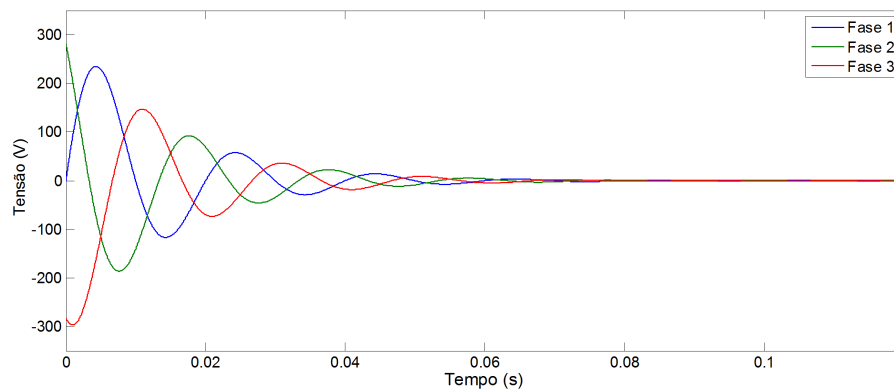
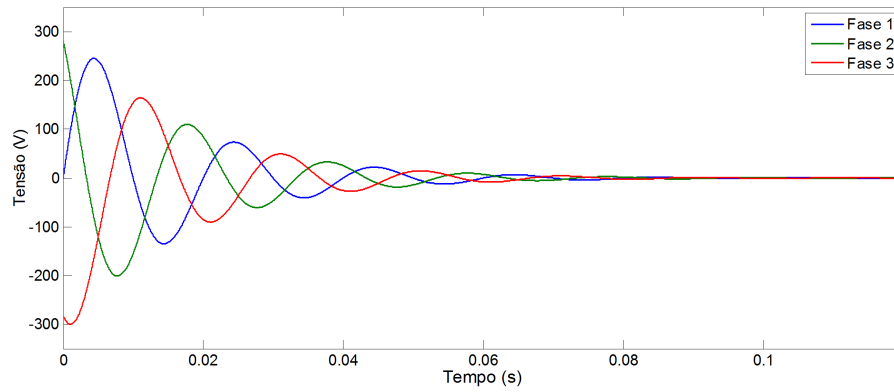
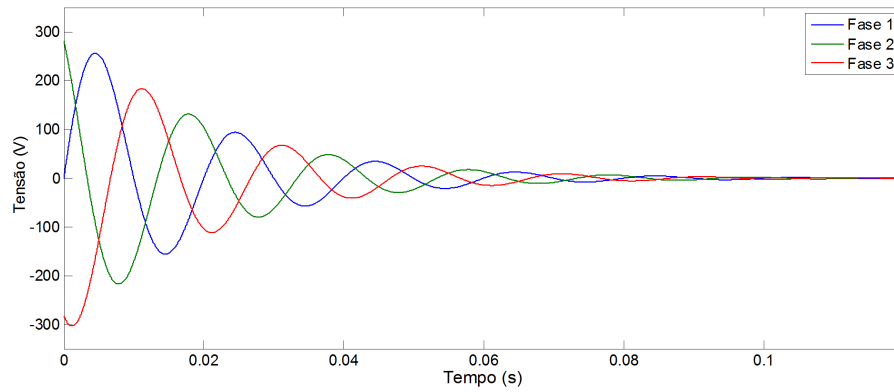
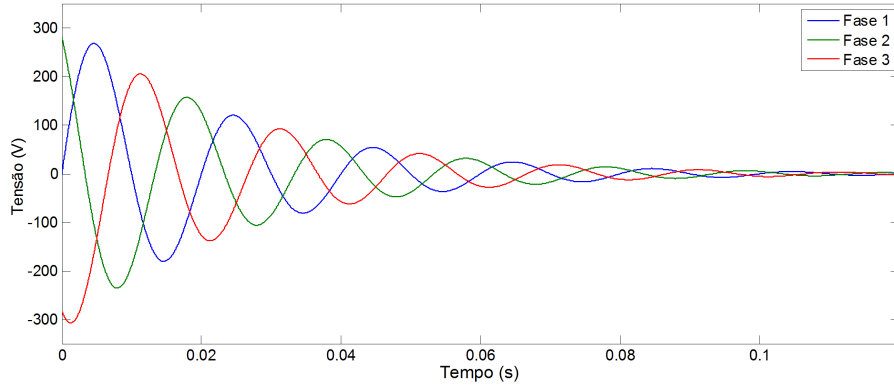


Figura 4.7: Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de uma interrupção

4.1.4 Cava de tensão

Uma cava de tensão apenas é considerada se a descida do valor eficaz ultrapassar 10% do valor estipulado. De forma a ser coerente com a norma, considerou-se sinais em que, o valor eficaz estipulado desce em mais de 10% durante a janela de amostragem. Os 4 sinais, apresentam diferentes valores de cavas, com diferentes comportamentos de descida e diferente duração. Na figura 4.8 apresenta-se o conjunto das quatro situações usadas no exemplo de aprendizagem. Para $v(t)_{sag1}$ e $v(t)_{sag3}$ os sinais decrescem para perto de 85% do valor nominal, no entanto o comportamento da descida difere temporalmente, os sinais $v(t)_{sag2}$ e $v(t)_{sag4}$ atingem valores perto de 82% do valor nominal, também estes com dinâmicas de descida diferentes.

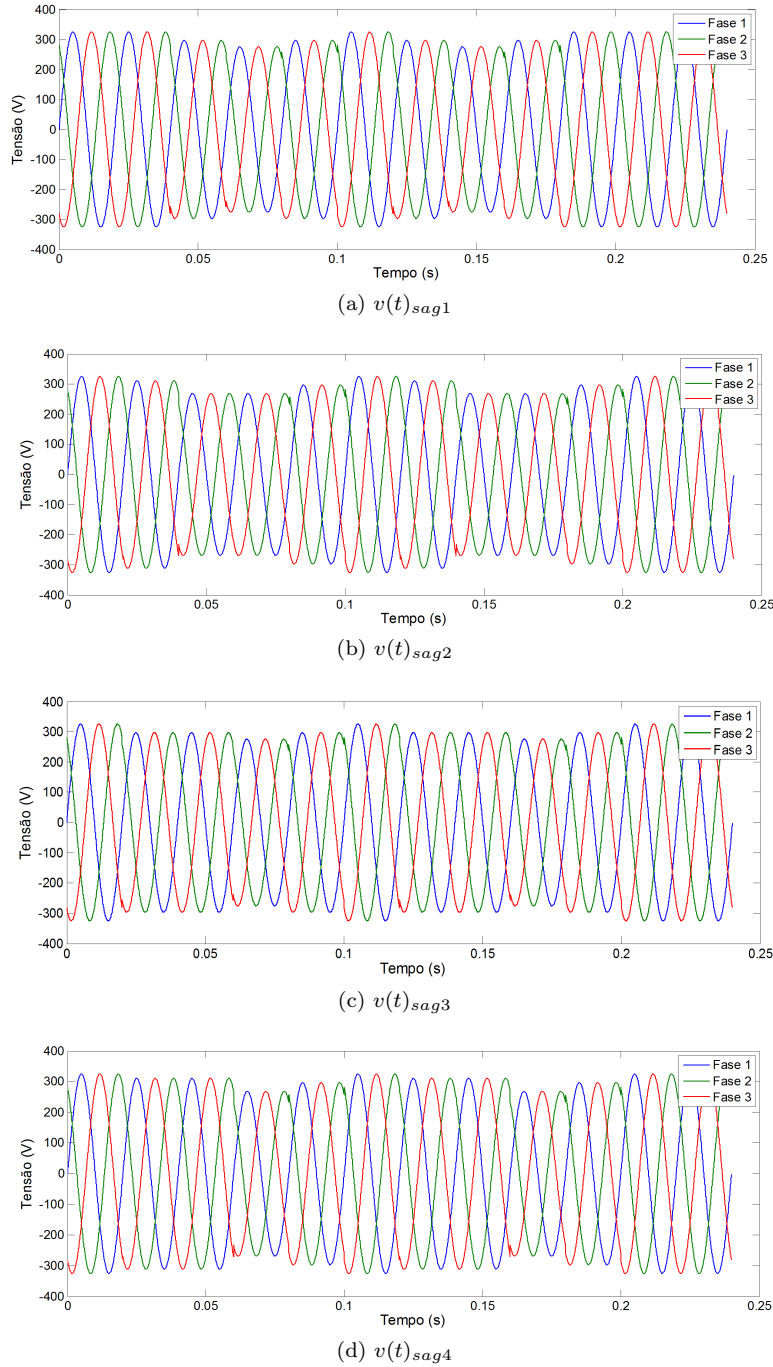


Figura 4.8: Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de uma cava

4.1.5 Sobretensão

À semelhança da cava de tensão, a sobretensão implica uma variação superior a 10% do valor eficaz estipulado, neste caso uma variação positiva. Seguindo a mesma lógica que para a cava de tensão, os quatro sinais considerados tem diferentes valores de sobretensão, com comportamentos e duração distintos. Na figura 4.9, apresentam-se os exemplos usados para a inferência desta gramática. Para os sinais $v(t)_{swell1}$ e $v(t)_{swell3}$ o valor eficaz é incrementado em 17%, com dinâmicas diferentes, $v(t)_{swell2}$ alcança 17% acima do valor eficaz e $v(t)_{swell4}$ apresenta um incremento no valor eficaz de 21%.

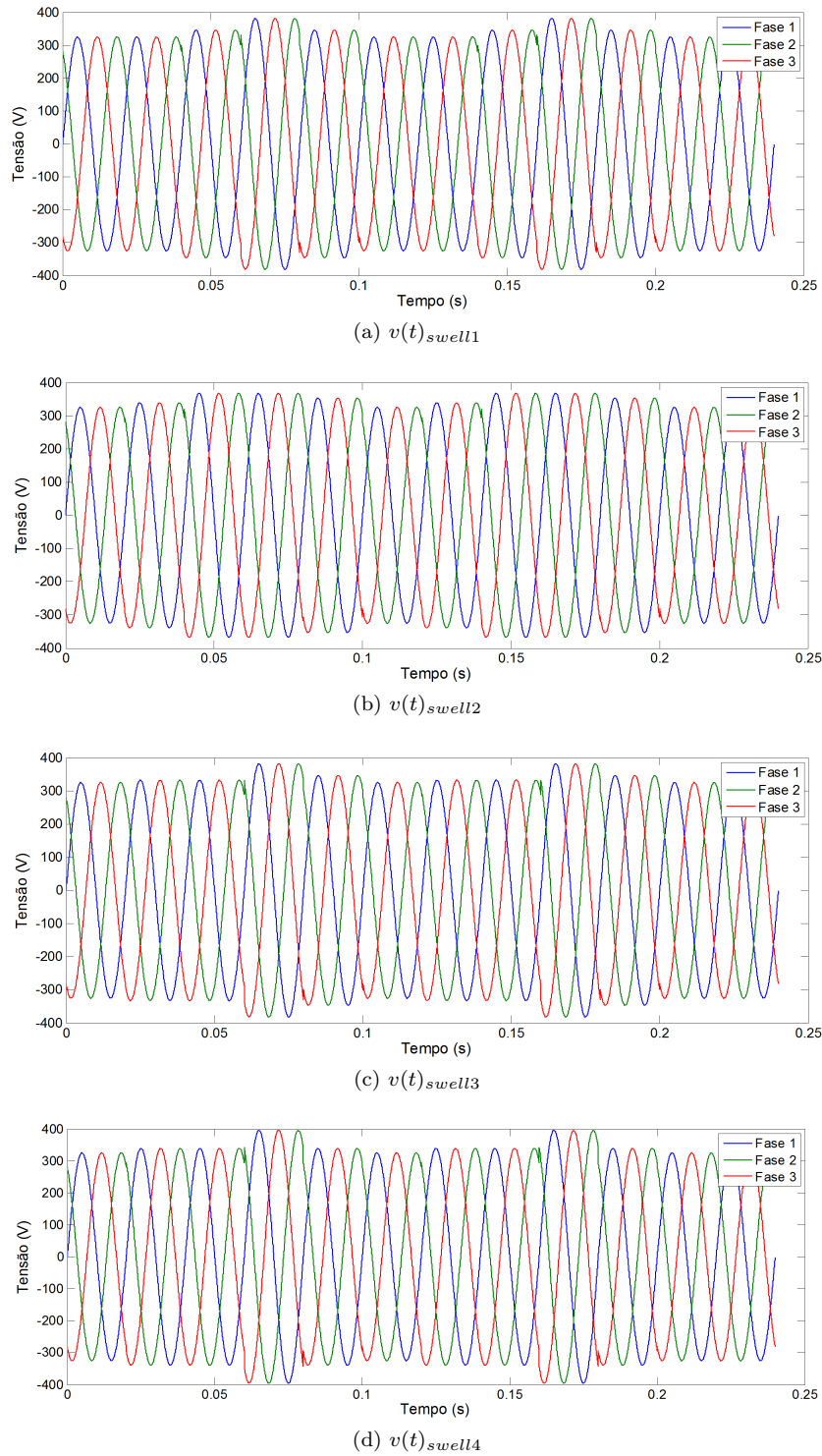


Figura 4.9: Exemplos para aprendizagem da ocorrência de uma sobretensão

4.1.6 Desequilíbrio de tensões

Como foi explicado no capítulo 2, o desequilíbrio de tensões engloba eventos que afectam qualquer uma das características, amplitude ou desfasamento do sistema trifásico. Nesta dissertação, apenas se considerou a situação em que é afectada a amplitude de uma das fases de cada vez. De forma homóloga à flutuação da tensão apresentada em 4.1.2, a sua simulação baseia-se no mesmo princípio, ou seja, efectuou-se uma modulação de amplitude numa das fases.

Na figura 4.10, verifica-se a alteração da 1ª fase. As alterações das 2ª e 3ª fases são apresentadas nas figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

Em (4.5), encontram-se os sinais usados nas várias simulações de desequilíbrio de tensões, em que x , representa a fase que está perturbada, as restantes fases mantêm um comportamento sinusoidal normal para o sistema trifásico.

$$\begin{aligned}
 v(t)_{unbf_{x^1}} &= (V_{max} - V * \cos(\frac{\omega}{2}t)) * \sin(\omega t) \\
 v(t)_{unbf_{x^2}} &= (V_{max} - V * \cos(\frac{\omega}{3}t)) * \sin(\omega t) \\
 v(t)_{unbf_{x^3}} &= (V_{max} + V * \cos(\frac{\omega}{2}t)) * \sin(\omega t) \\
 v(t)_{unbf_{x^4}} &= (V_{max} + V * \cos(\frac{\omega}{3}t)) * \sin(\omega t)
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

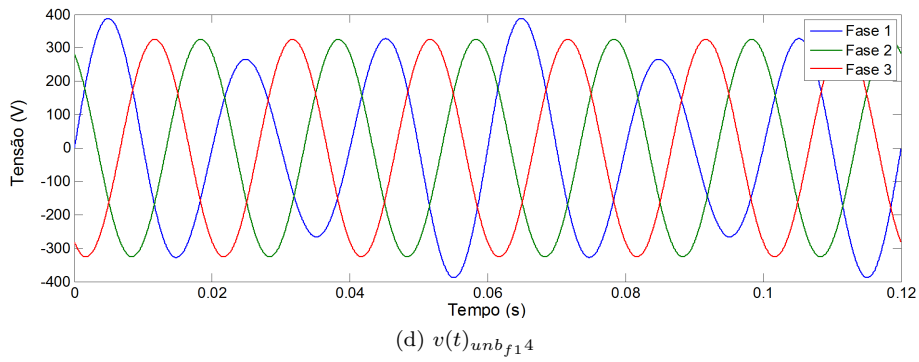
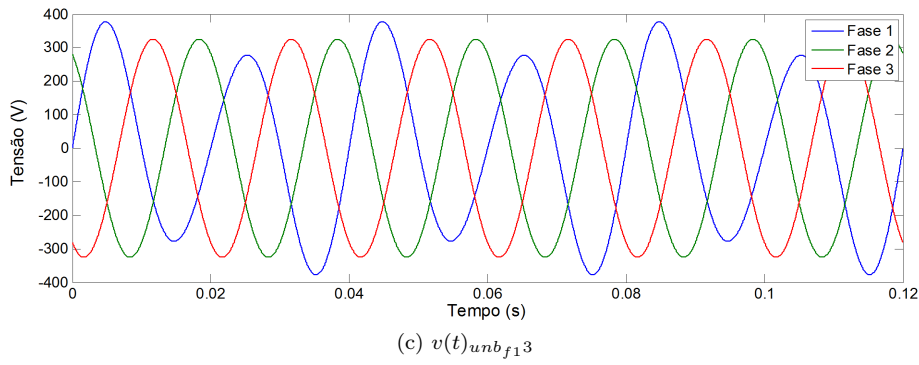
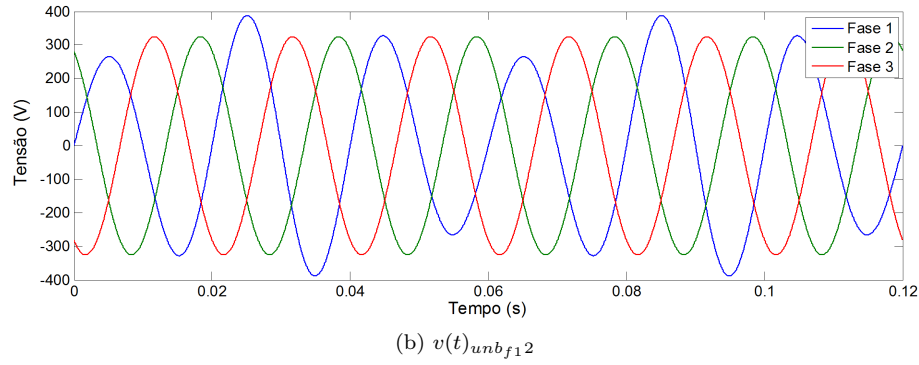
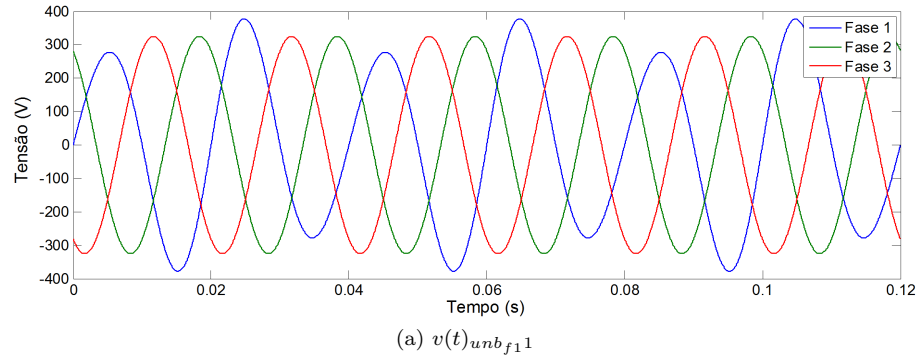


Figura 4.10: Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de desequilíbrio da tensão na fase 1

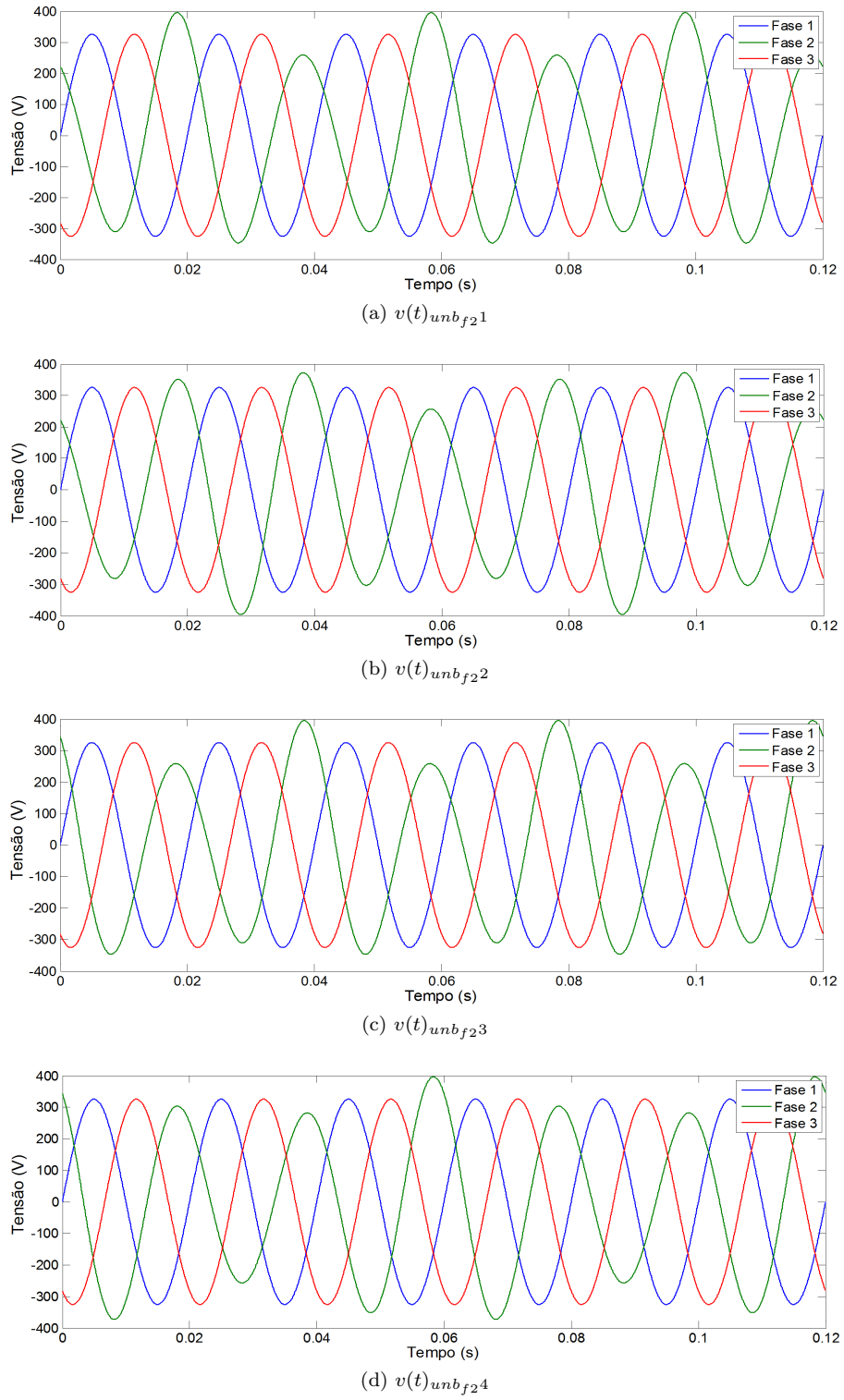


Figura 4.11: Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de desequilíbrio da tensão na fase 2

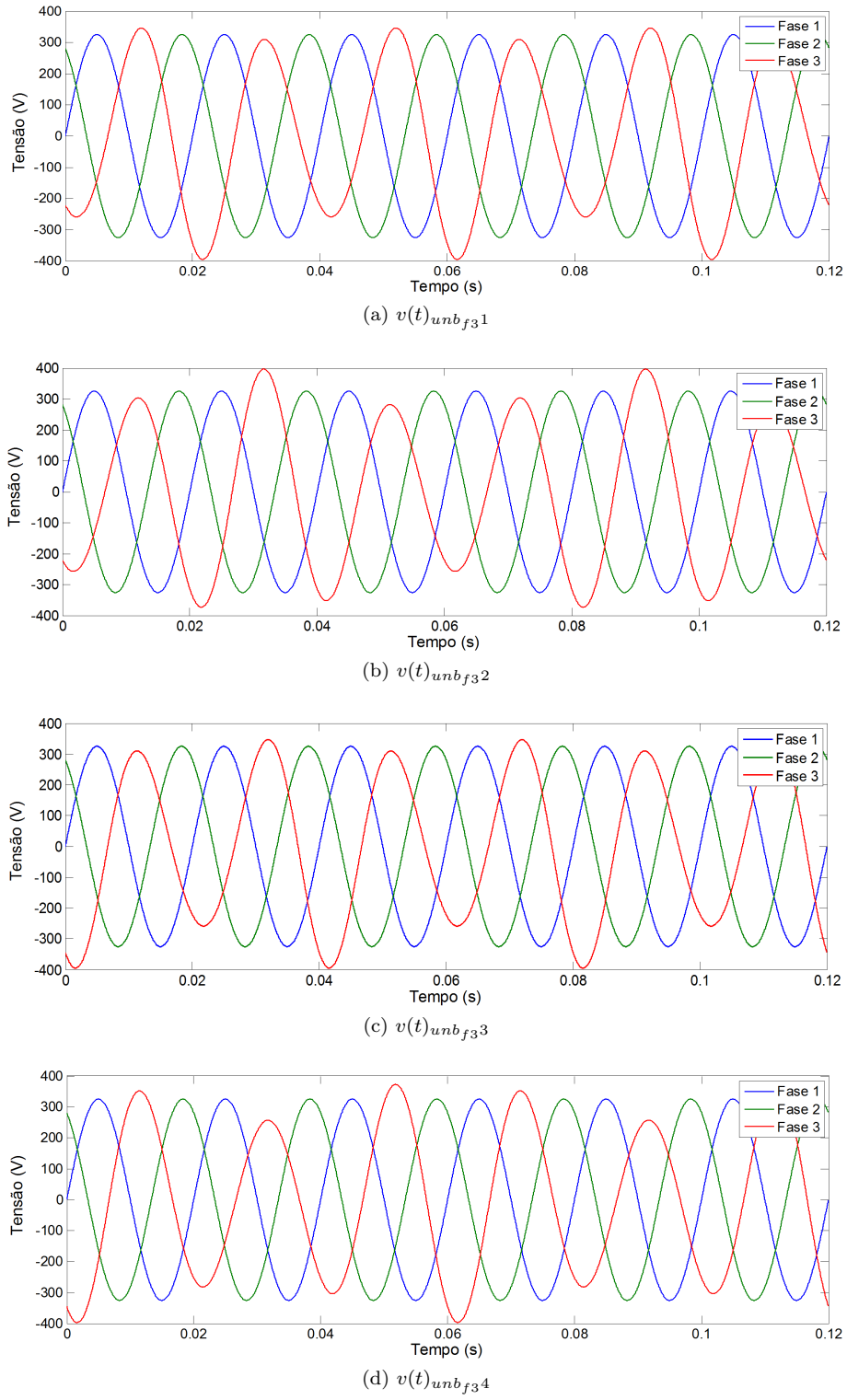


Figura 4.12: Exemplos para a aprendizagem da ocorrência de desequilíbrio da tensão na fase 3

4.2 Processamento do sinal

Após a simulação dos eventos, é necessário inferir as respectivas gramáticas. Como foi referido em 3.2.3.1 a escolha de um bom alfabeto é fundamental para o bom desempenho dos algoritmos desenvolvidos. Desta forma, antes da escolha do alfabeto, são consideradas duas operações distintas: a aplicação de uma transformada e a criação de um sinal comparativo com a situação não perturbada. Somente depois se codifica o sinal resultante em função do alfabeto terminal escolhido.

A divisão deste processo em duas partes tem como função a simplificação de todo o processamento do sinal. Isto porque a criação de um alfabeto directamente sobre os três diferentes sinais do sistema trifásico resultaria em gramáticas mais complexas, visto que seria necessário correlacionar as gramáticas das três fases e retirar novas gramáticas. O recurso à Transformada de Concordia vai assim possibilitar que seja feita a análise num sistema (α, β) , tornando a representação do sistema trifásico mais simples.

4.2.1 Transformada de Concordia e comparação com situação normal

Como o sistema em análise é um sistema trifásico, realizar uma análise independente de cada fase é exigente em termos de computação. Assim, é interessante o uso da transformada de Concordia, sendo possível transformar o sistema de três dimensões (três fases) numa representação a duas dimensões, e de mais fácil análise. Após esta transformação, é efectuada uma comparação da distância radial entre os dois resultados (sistema sem falhas e sistema perturbado), criando um novo sinal com a distância entre as transformações de ambos os sinais.

Um exemplo explicativo de uma situação de harmónicas é apresentado na figura 4.13.

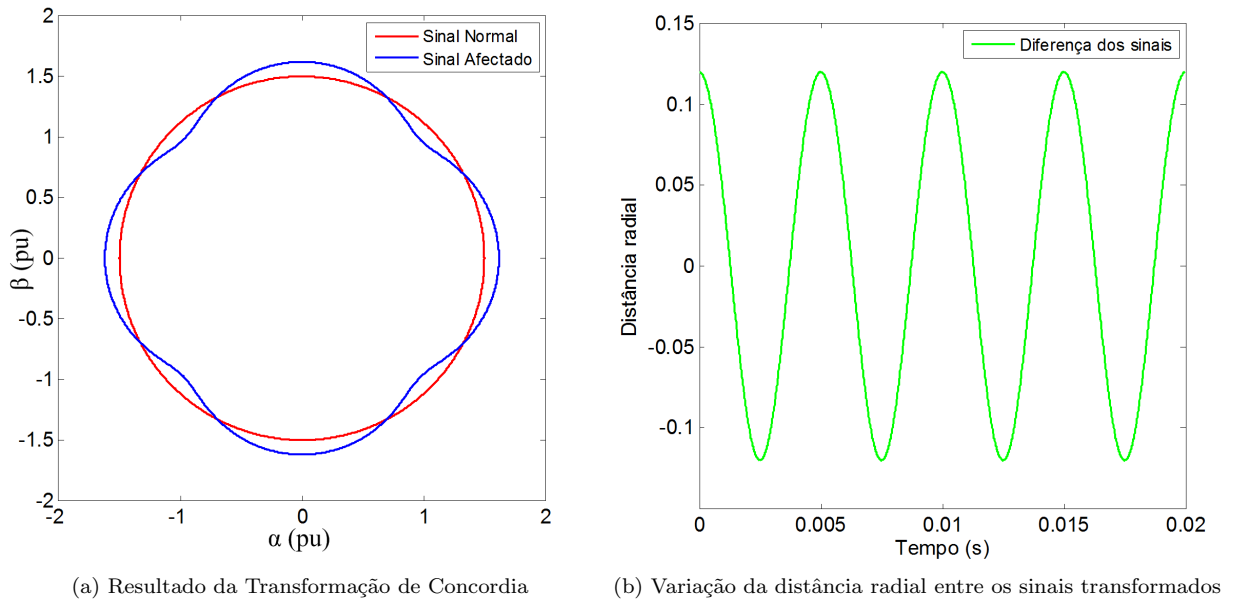


Figura 4.13: Comparação dos sinais transformados por forma a obter o sinal a analisar gramaticalmente

4.2.2 Discretização Alfabética

Nas linguagens formais, como foi explicado no capítulo 3, é necessário o uso de um alfabeto adequado à situação em estudo.

Desta forma, o alfabeto escolhido consiste na atribuição de níveis ao sinal da distância radial, tendo em conta as especificações normalizadas em [16]. Isto é, seguindo os valores de referência para os eventos, foi verificada a sua relação na Transformada de Concordia, e aplicada na variação da distância entre os sinais. Foi necessário verificar que valores a diferença da distância radial tomava para o limite da cava, sobretensão e interrupção, e ainda considerar uma pequena banda à volta do valor zero.

Na figura 4.14, apresenta-se o alfabeto escolhido e os respectivos níveis. O alfabeto terminal proposto consiste em $\Sigma_{T_1} = \{a, b, c, d, e, f\}$.

Verificou-se que numa situação, em que o valor eficaz da onda, é 0.9 pu do valor nominal, a respectiva distância radial medida é -48,79, assim este é o limite mínimo para a identificação de uma cava de tensão; da mesma forma, quando o valor eficaz da onda é 1.1 pu, a sua distância radial é 48.79. Para uma interrupção, 0.01 pu, a distância radial situa-se em -483.

Os valores para a definição dos níveis são apresentados na tabela 4.2.

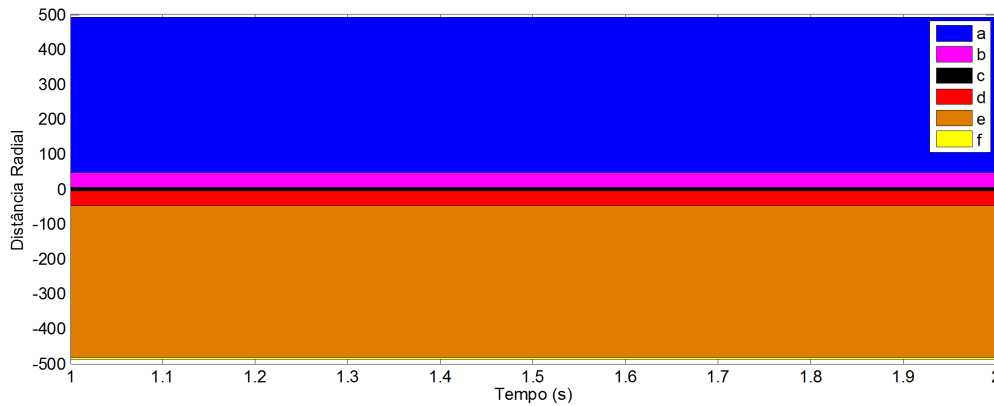


Figura 4.14: Representação do alfabeto e do seu significado

Tabela 4.2: Valores do alfabeto

Símbolo	Valor da distância
<i>a</i>	$]48,79; \infty[$
<i>b</i>	$]5; 48,79]$
<i>c</i>	$[-5; 5]$
<i>d</i>	$] -5; -48,79]$
<i>e</i>	$] -48,79; -483[$
<i>f</i>	$[-483; -487]$

Através da tabela 4.2, os valores numéricos da distância radial, obtida da comparação da Transformada de Concordia, são substituídos pelos seus respectivos símbolos., resultando numa palavra composta por símbolos pertencentes a Σ_{T_1} .

4.3 Inferência

O algoritmo usado na inferência das gramáticas foi o segundo método apresentado em 3.2.3.2.

O fluxograma da figura 4.15, representa este algoritmo, tendo-se acrescentado algumas características ao método, que serão explicadas adiante.

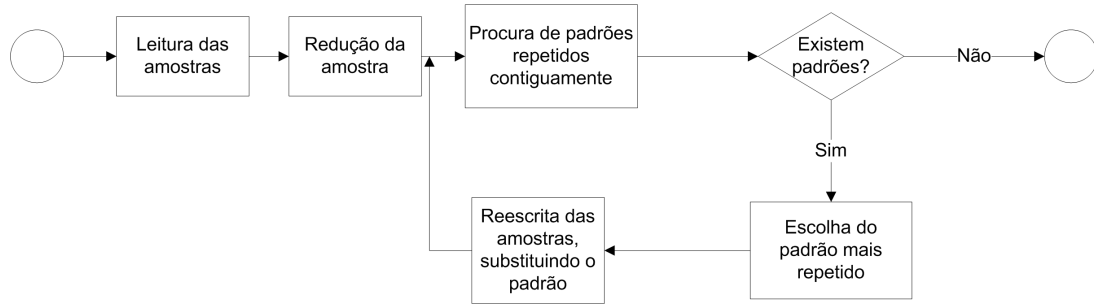


Figura 4.15: Fluxograma do método de inferência

Em primeiro lugar adquirem-se as amostras, provenientes do anterior sinal de distância radial, já codificado com o alfabeto apresentado na tabela 4.2. É feita uma redução do tamanho da amostra cuja razão é explicada de seguida. Procuram-se os padrões de símbolos terminais que se repetem de forma recursiva e contígua e, na existência dos mesmos, procede-se à substituição destes padrões repetidos por outro símbolo, tal como é explicado em 3.2.3.

A anterior redução da *string* é efectuada conforme o exemplo seguinte:

- Se a amostra inicial for *aaabbccdddbaaaa*, a sua correspondente reduzida é *abcdba*.

As repetições da mesma letra são reduzidas a uma única ocorrência, perdendo-se a informação da característica temporal do sinal.

Existe um bloco de memória que guarda um registo dos padrões que já foram procurados, evitando, assim, a ineficiência de voltar a procurar os mesmos conjuntos de letras. Para perceber melhor este problema, é necessário considerar a situação em que não existe nenhum padrão repetido sucessivamente; se a palavra contém 10 letras, a variável que guarda os padrões que já foram procurados, vai ter a seguinte composição apresentada na tabela 4.3, guardando 9 padrões com 1 letra, 7 padrões com 2 letras, 5 padrões com 3 letras, 3 padrões com 4 letras e 1 padrão com 5 letras.

Tabela 4.3: Tabela da quantidade de padrões guardados

Tamanho do padrão (letras)	Número de padrões guardados
1	9
2	7
3	5
4	3
5	1

Assim o total de padrões que é guardado é igual a 25, resultando no seguinte somatório do valor total, em que TAM é o tamanho da palavra: $\sum_{n=1}^{TAM/2} TAM - (2 * n - 1)$. Deste modo, se a palavra tiver um tamanho de 1000, o número total máximo de padrões será 250000. Portanto, com o avançar das iterações, sempre que é necessário verificar se o padrão já foi pesquisado, considerando a forma como o tamanho da variável aumenta, a partir de certa iteração, o tamanho da variável é tão grande que se torna lenta a procura de um padrão nesta, tornando todo o processo cada vez mais moroso.

Devido a este efeito, foi tomada a opção de encurtar as palavras, perdendo alguma informação, mas melhorando muito o tempo de computação. Deixa de ser possível relacionar as gramáticas geradas com as propriedades temporais da perturbação, como, por exemplo, a diferença entre a ocorrência de harmónicas e a flutuação do valor de tensão em valores abaixo de 10% do valor nominal, visto que ambas geram sinusóides no gráfico da distância radial; se o conhecimento da frequência da variação fosse incorporado na gramática, seria possível diferenciar estas duas perturbações de forma mais correcta.

CAPÍTULO 4. INFERÊNCIA GRAMATICAL DE EVENTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA

Após a finalização do algoritmo de inferência, as substituições que foram feitas são recolhidas. Com o auxílio da notação de expressões regulares, obtém-se a representação da gramática, que pode ser usada na identificação da linguagem a que pertencem outras palavras.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com as *strings* de aprendizagem e respectivas gramáticas inferidas. Uma análise anterior dos dados obtidos levou a uma reorganização do alfabeto proposto. Por fim, são apresentados vários ensaios com dados simulados e com dados reais.

5.1 Inferência gramatical a partir de dados simulados

Nesta secção é apresentada a inferência gramatical das gramáticas que representam as linguagens associadas a cada tipo de perturbação. Os sinais perturbados simulados são comparados com sinais não perturbados e as gramáticas inferidas a partir das amostras dos sinais de distância, obtidos conforme explicado anteriormente em 4.2.1.

5.1.1 Distorção Harmónica

Na figura 5.1, apresenta-se o resultado da aplicação da transformada de Concordia para as quatro situações de harmónicas consideradas em 4.1.1.

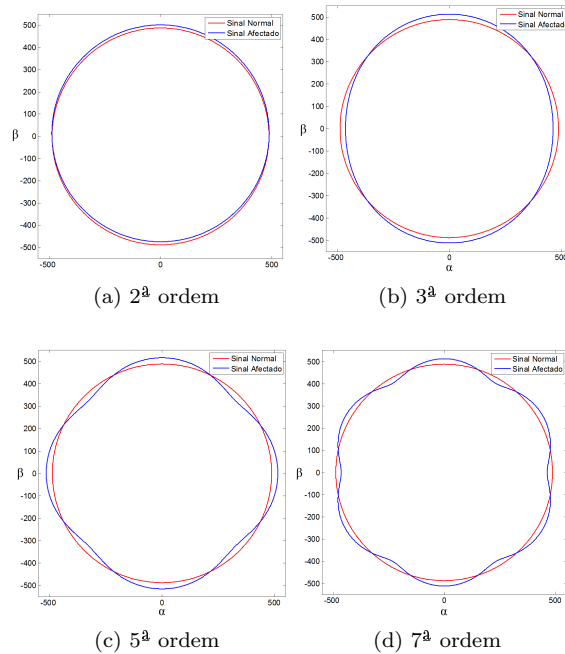


Figura 5.1: Comparação das transformadas (harmónicas)

A figura 5.2 apresentam-se as distâncias radiais entre o sinal sem perturbações e o sinal com perturbações.

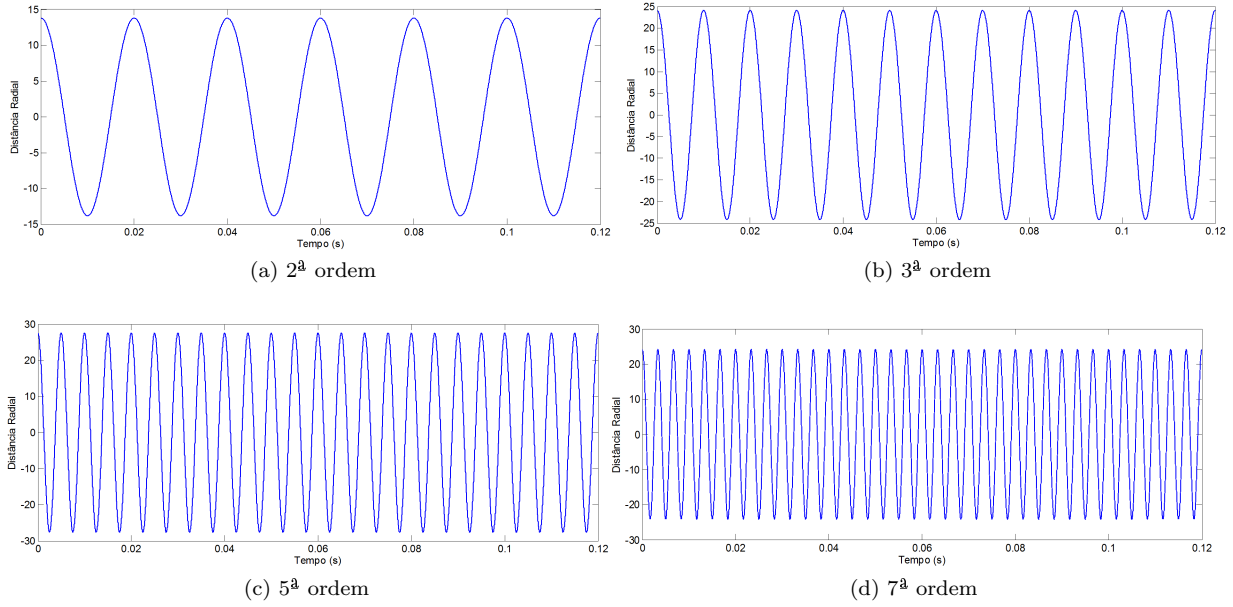


Figura 5.2: Distâncias radiais referentes a harmónicas

Inferindo a partir do anterior conjunto de *strings* e considerando o alfabeto da tabela 4.2, obtém-se a gramática correspondente a este tipo de perturbação. Como foi explicado, usou-se a notação de expressões regulares, pela sua fácil compreensão e manuseamento.

Resulta o seguinte conjunto de *strings* e a substituição de símbolo que foi efectuada.

$$strings \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} zcb \\ zcb \\ zcb \\ zcb \end{array} \right. \quad \text{substituições} \Rightarrow \left\{ z = (cbcd)^+ \right.$$

Com a *string* zcb , onde $z = (cbcd)^+$, é possível retroceder as substituições, resultando em $(cbcd)^+cb$

Assim, pode concluir-se que a ocorrência de harmónicas tem como expressão regular (gramática) $(cbcd)^+$.

5.1.2 Flutuações de Tensão

Na figura 5.3 o resultado da Transformada de Concordia para as quatro flutuações de tensão consideradas em 4.1.2. As respectivas das distâncias radiais são apresentadas na figura 5.4.

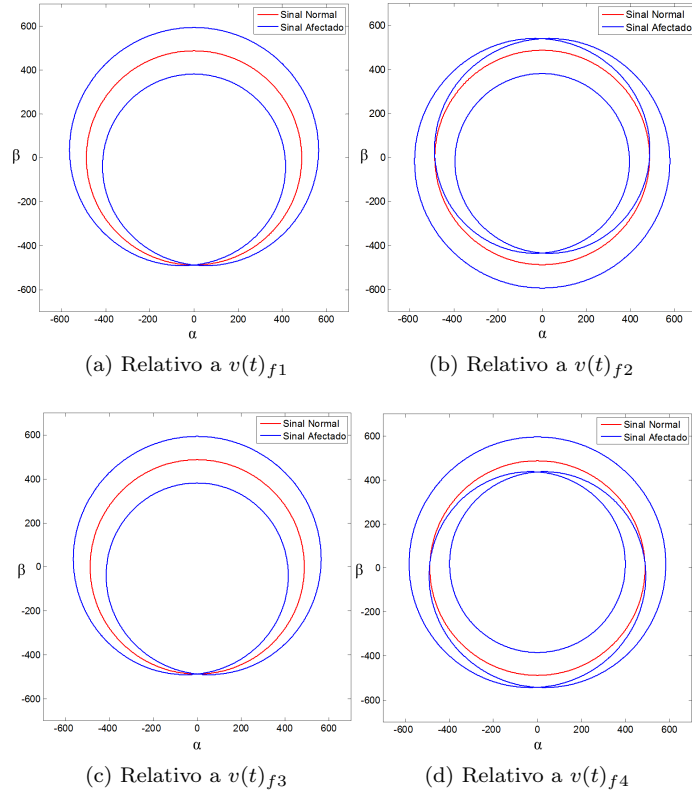


Figura 5.3: Comparação das transformadas (flutuações de tensão)

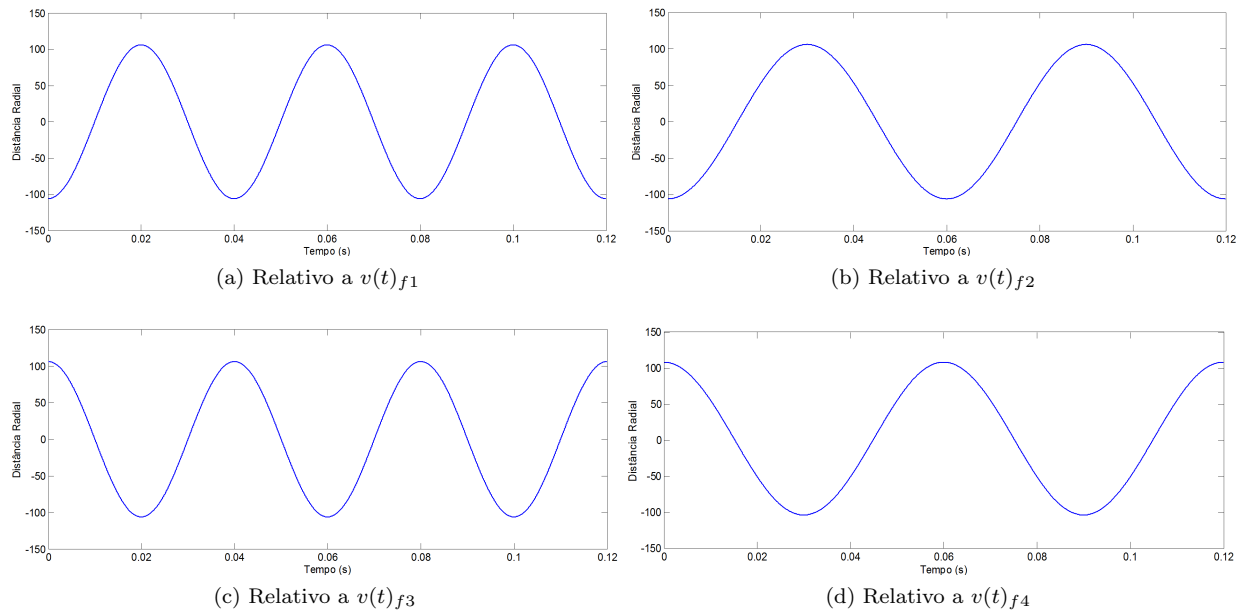


Figura 5.4: Distâncias radiais referentes a flutuações de tensão

Criando as *strings* baseadas no gráfico das distâncias, e inferindo a partir destas, recolhe-se a

palavra final substituída e as respectivas substituições.

$$strings \Rightarrow \begin{cases} zcba \\ zcbabcde \\ zcbabcde \\ zcba \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \left\{ z = (cbabced)^+ \right.$$

Aplicando a operação de adição: $zcba + zcbabcde$ e, retrocedendo nas substituições, obtém-se: $(cbabced)^+cba + (cbabced)^+cbabcde$.

Conclui-se que na ocorrência de flutuações, a sua expressão regular (gramática) é $(cbabced)^+$, que se pode repetir.

5.1.3 Interrupção

Na figura 5.5 apresentam-se os resultados da Transformada de Concordia nas interrupções consideradas em 4.1.3 e, na figura 5.6, as respectivas distâncias radiais.

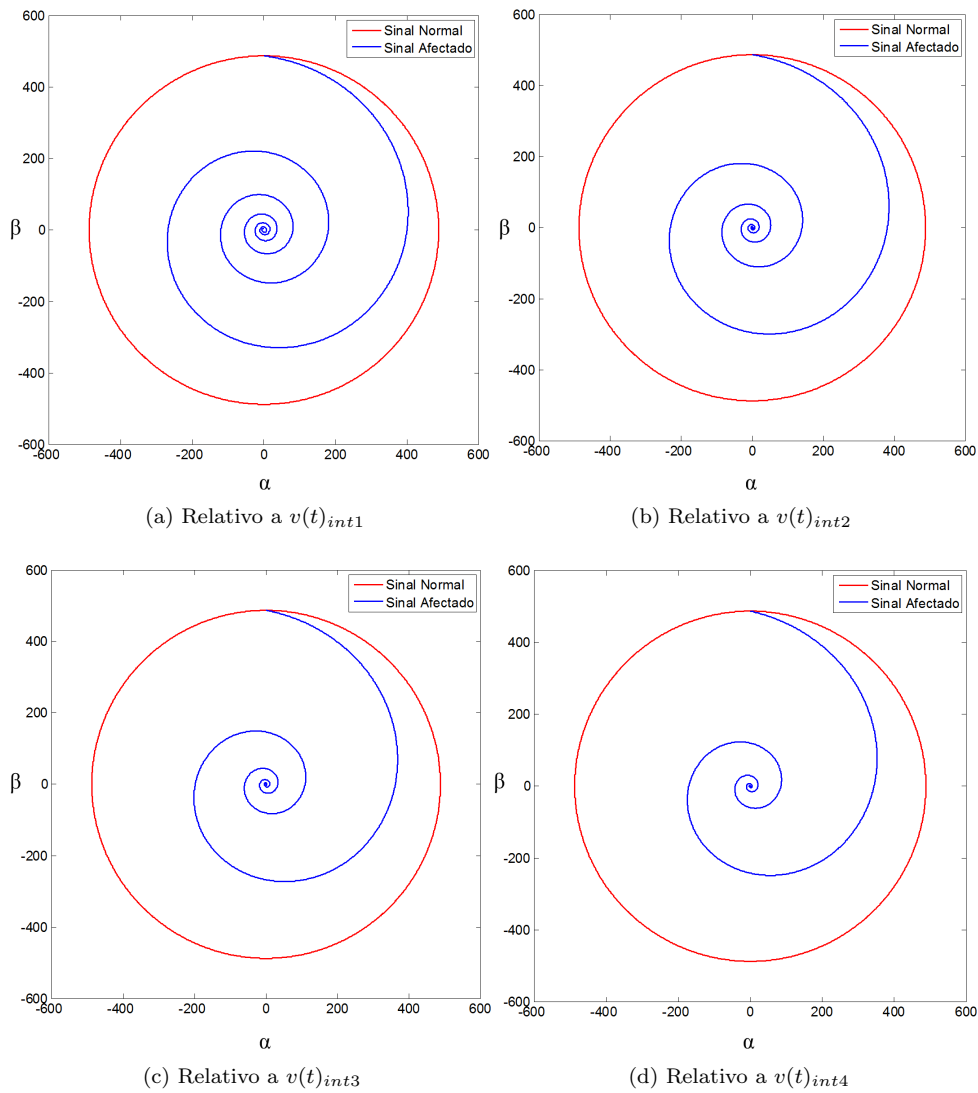


Figura 5.5: Comparação das transformadas (interrupção)

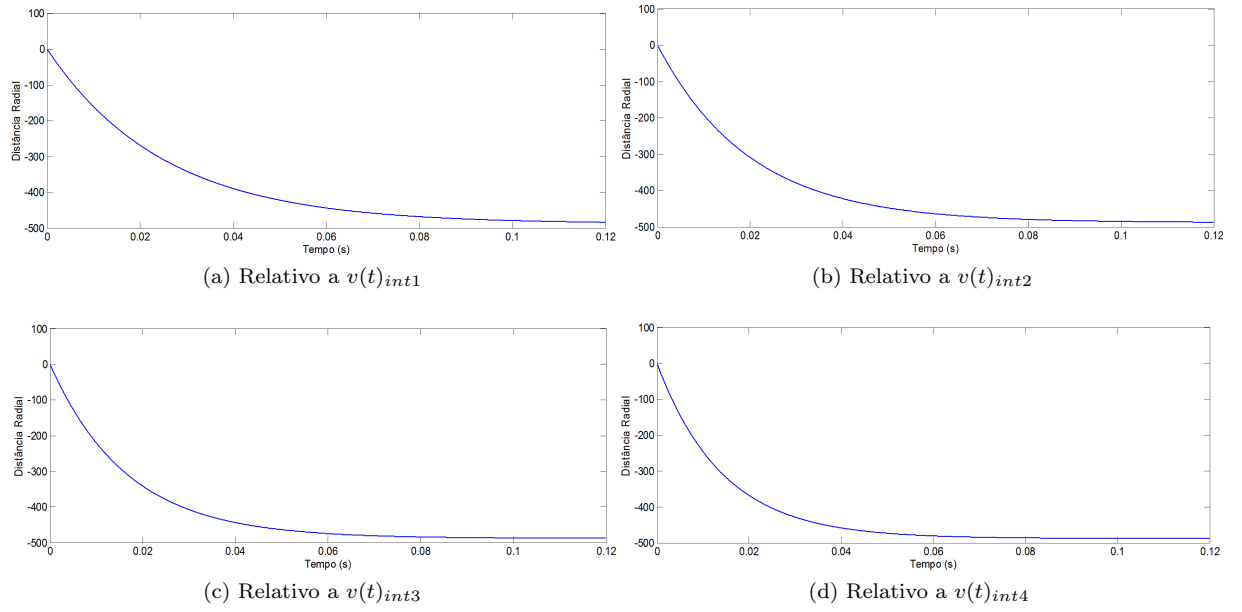


Figura 5.6: Distâncias radiais referentes a interrupções

Na situação de interrupção, não existe um padrão no evento, mas antes uma condição de que, o valor alcança um limite mínimo normalizado por [16]:

$$strings \Rightarrow \begin{cases} cdef \\ cdef \\ cdef \\ cdef \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{\emptyset\}$$

Assim, a expressão regular (gramática) consiste em $cdef$.

5.1.4 Cava de tensão

A figura 5.7 exibe os resultados da Transformada de Concordia da perturbação considerada em 4.1.4, na figura 5.8 apresentam-se as distâncias radiais relativas às transformações.

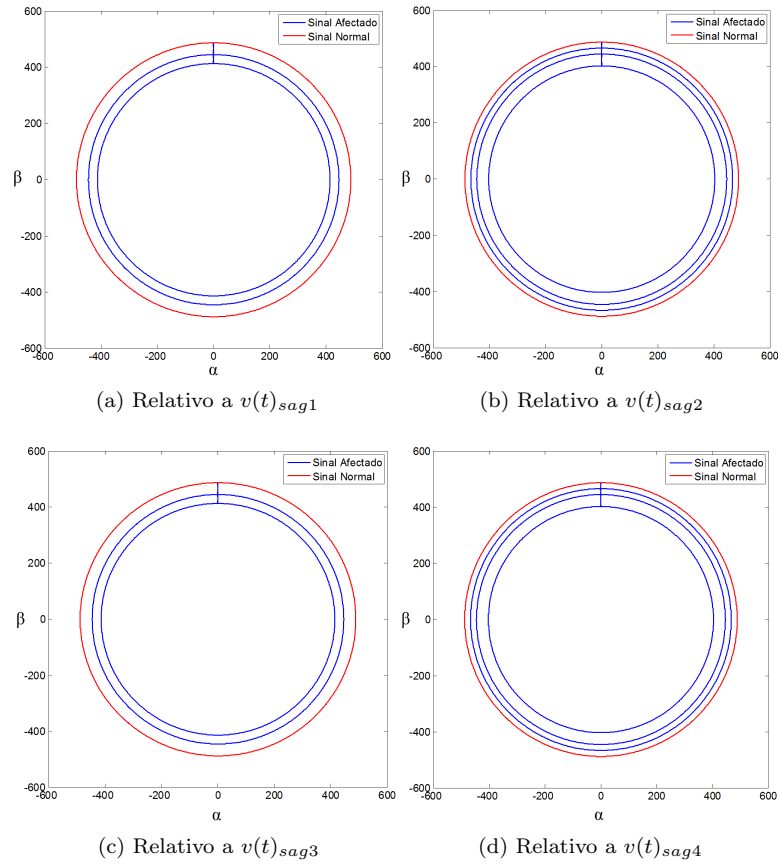


Figura 5.7: Comparação das transformadas (cava de tensão)

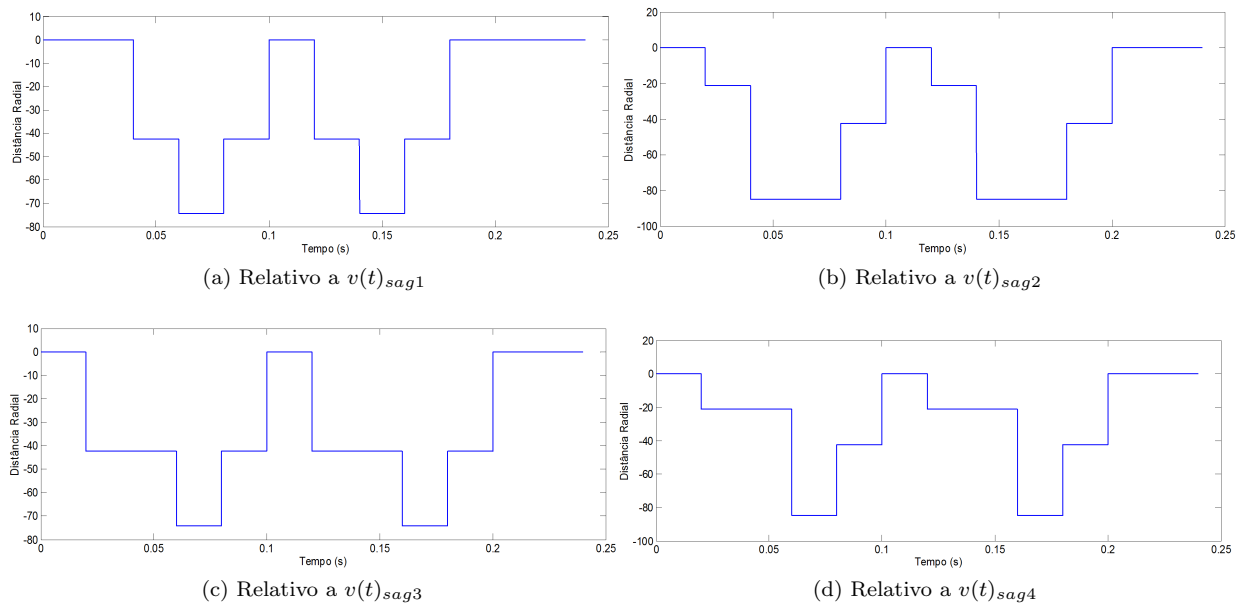


Figura 5.8: Distâncias radiais referentes a cavas de tensão

De seguida, verifica-se as *strings* resultantes das distâncias radiais e, as respectivas substituições que o algoritmo efectuou:

$$strings \Rightarrow \begin{cases} zc \\ zc \\ zc \\ zc \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{z = (cded)^+\}$$

Aplicando as substituições $(cded)^+c$, obtém-se a seguinte expressão regular (gramática): $cded$. Percebe-se que a situação de cava implica uma diminuição da distância radial das transformadas, distância essa que tem de alcançar o nível de e , correspondendo a 0,9 pu, conforme normalizado em [16].

5.1.5 Sobretenção

A figura 5.9 apresenta os resultados da Transformada de Concordia dos sinais de sobretenção considerados em 4.1.5 e as respectivas distâncias radiais estão presentes na figura 5.10.

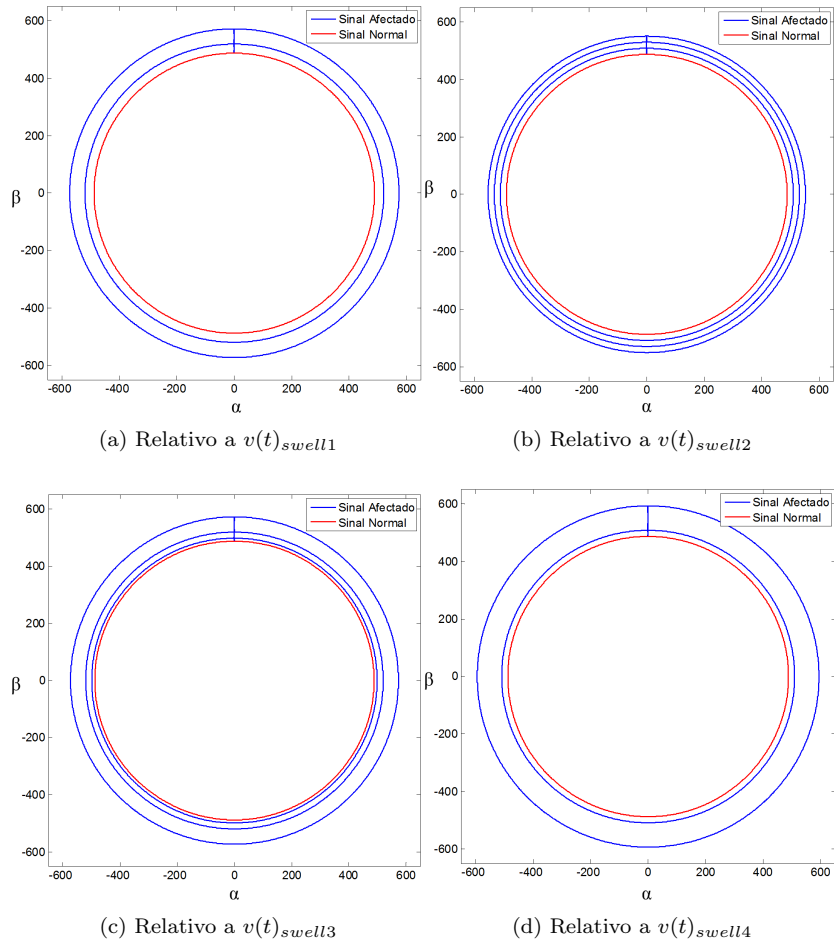


Figura 5.9: Comparação das transformadas (sobretenção)

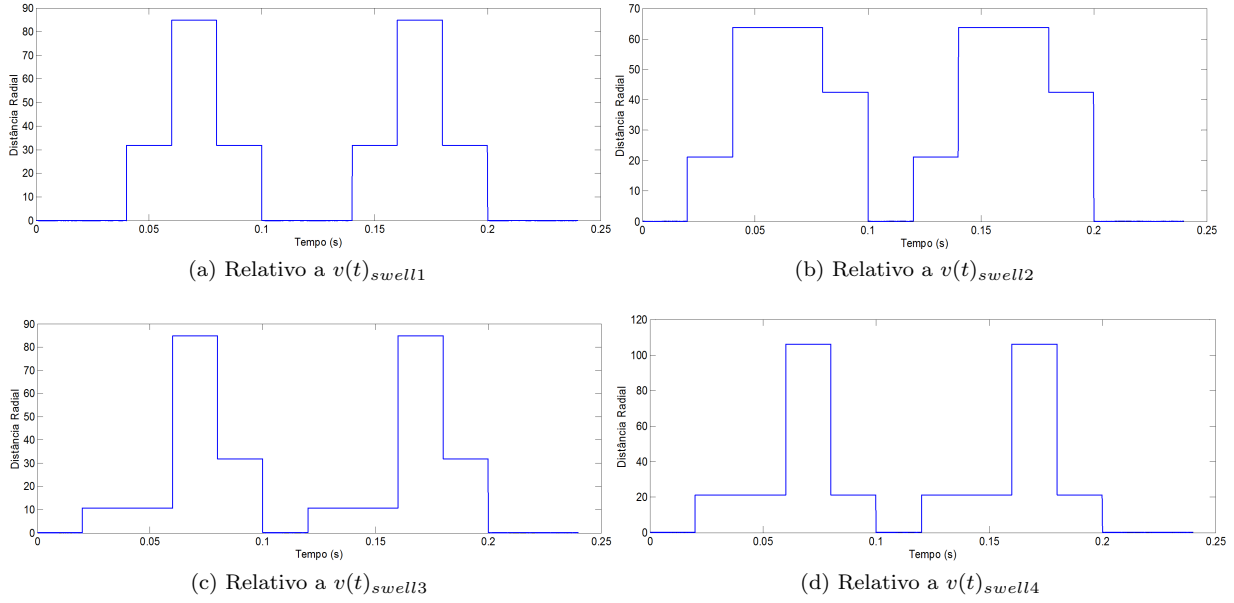


Figura 5.10: Distâncias radiais referentes a sobretensões

Resultando das distâncias radiais seguintes *strings* e, respectivas substituições efectuadas pelo algoritmo:

$$strings \Rightarrow \begin{cases} zc \\ zc \\ zc \\ zc \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{z = cbab\}$$

Aplicando as substituições $(cbab)^+c$, extrai-se a seguinte expressão regular (gramática): $cbab$. Verifica-se uma subida no valor da distância radial das transformadas, alcançando o nível a , que começa no valor correspondente a 1,1 pu, conforme considerado em [16].

5.1.6 Desequilíbrio de tensões

Nesta perturbação, são apresentados os resultados obtidos em cada fase separadamente; os dados são relativos aos sinais apresentados em 4.1.6. Para a 1ª fase, verifica-se na figura 5.11 as comparações dos resultados da Transformada de Concordia e, na figura 5.12, as respectivas distâncias radiais.

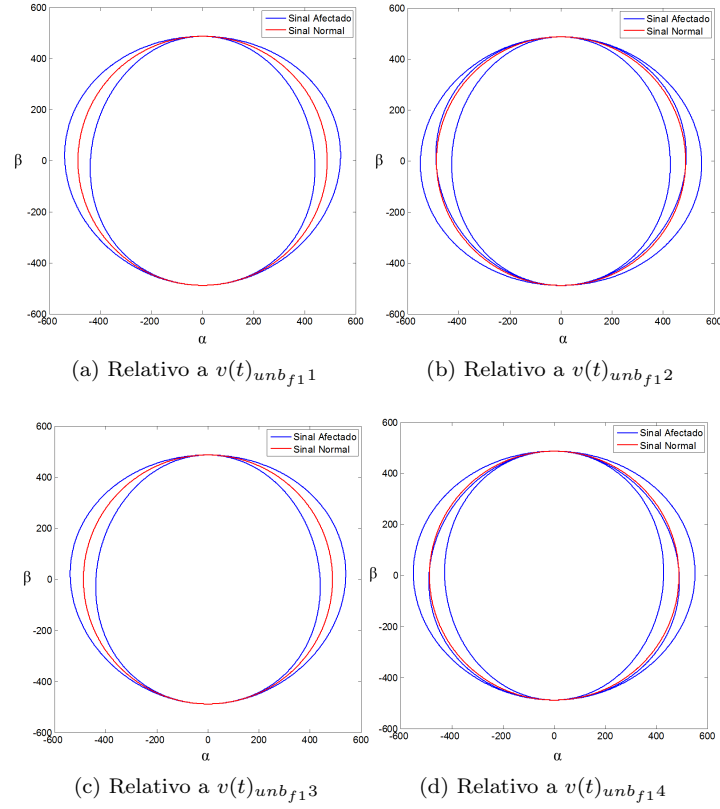


Figura 5.11: Comparação das transformadas (desequilíbrio da 1ª fase)

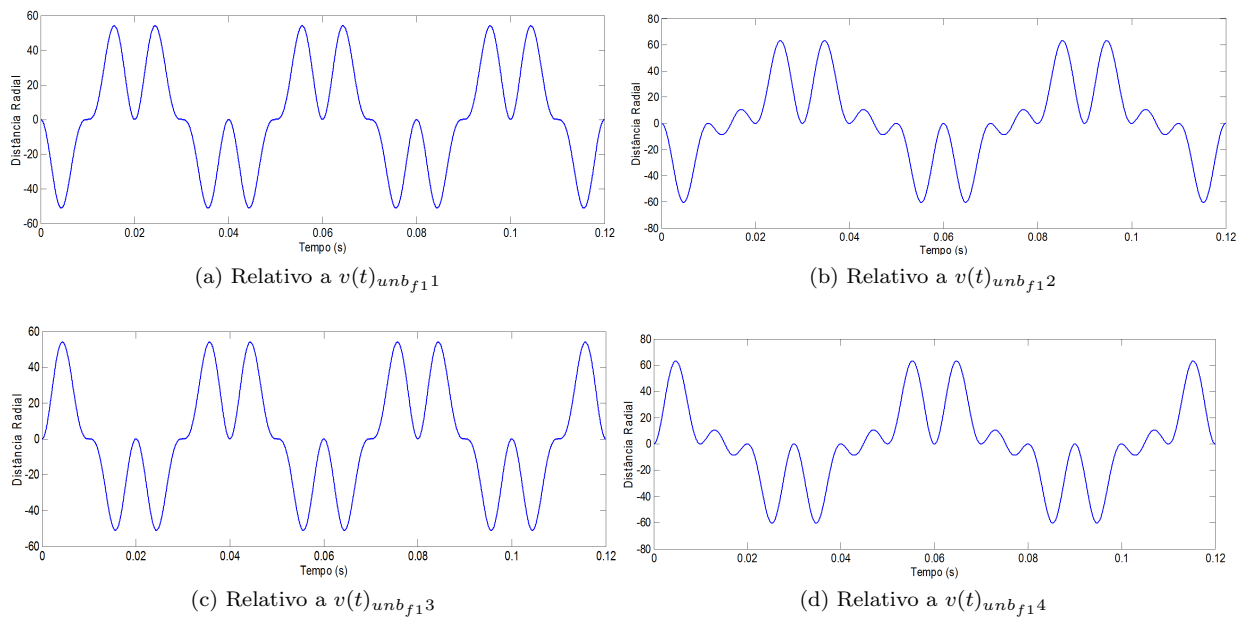


Figura 5.12: Distâncias radiais referentes a desequilíbrios na 1ª fase

Apresentam-se as seguintes *strings* e substituições efectuadas:

$$\text{strings} \Rightarrow \begin{cases} vzc \\ kcbzcbzdx \\ vc \\ kcbzc \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} k = (cbzcbcdxcd)^+ \\ v = (zx)^+ \\ x = (cded)^+ \\ z = (cbab)^+ \end{cases}$$

Após realizar todas as substituições das letras, obtém-se a seguinte expressão regular, que devido à sua dimensão cada *string* é apresentada separadamente, em vez de adicionada:

$$\begin{cases} ((cbab)^+(cded)^+)^+(cbab)^+c \\ (cb(cbab)^+cbcd(cdcd)^+cd)^+cb(cbab)^+cbcd(cdcd)^+c \\ ((cbab)^+(cded)^+)^+c \\ (cb(cbab)^+cbcd(cdcd)^+cd)^+cb(cbab)^+c \end{cases}$$

Nesta perturbação, verificam-se expressões regulares diferentes para cada simulação. Encontram-se dois padrões que melhor definem a gramática: $((cbab)^+(cded)^+)^+$ e $(cb(cbab)^+cbcd(cdcd)^+cd)^+$.

Simulando o mesmo tipo de perturbação, mas agora a ocorrer na fase 2, obtém-se as figuras 5.13 e 5.14.

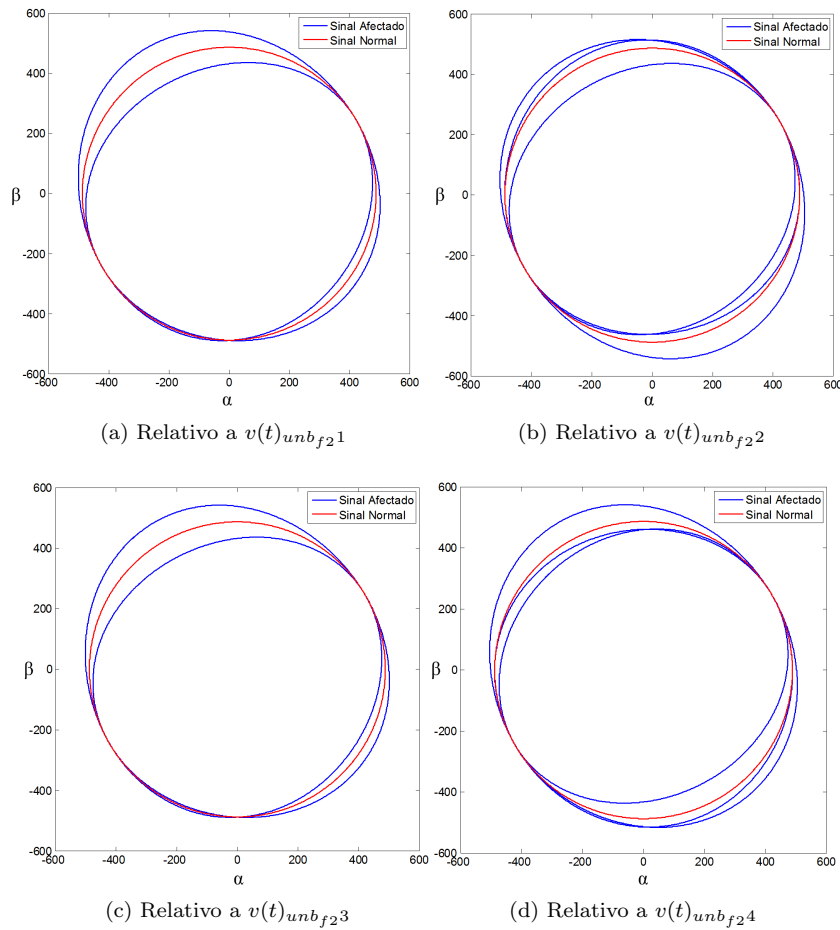


Figura 5.13: Comparação das transformadas (desequilíbrio da 2ª fase)

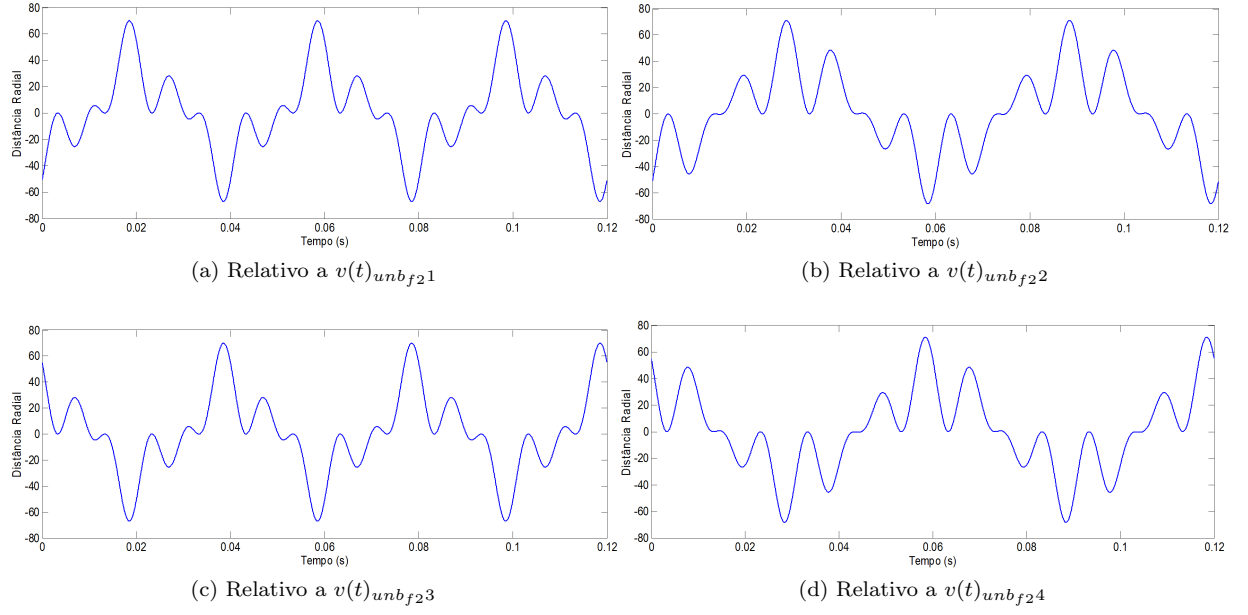


Figura 5.14: Distâncias radiais referentes a desequilíbrios na 2ª fase

Obtêm-se as seguintes *strings* e substituições:

$$strings \Rightarrow \begin{cases} vza \\ vza b z x e \\ v z a b z x e \\ vza \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} v = (zabzxedx)^+ \\ x = (cd)^+ \\ z = (cb)^+ \end{cases}$$

Efectuando as substituições necessárias nas *strings*, chega-se à seguinte expressão regular;

$$((cb)^+ ab(cb)^+ (cd)^+ ed(cd)^+)^+ (cb)^+ a + ((cb)^+ ab(cb)^+ (cd)^+ ed(cd)^+)^+ (cb)^+ ab(cb)^+ (cd)^+ e$$

Verifica-se que o padrão que caracteriza esta perturbação se apresenta como $((cb)^+ ab(cb)^+ (cd)^+ ed(cd)^+)^+$ e representa a expressão regular relacionada com a gramática.

Com perturbações a acontecerem na 3ª fase, obtêm-se as figuras 5.15 e 5.16.

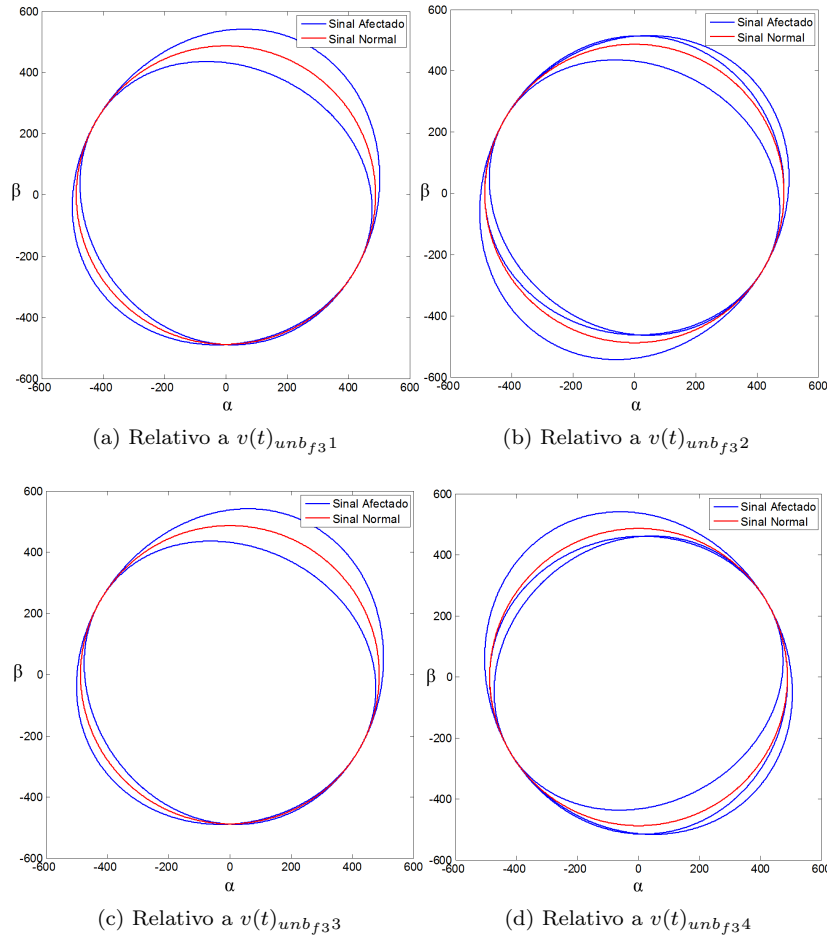


Figura 5.15: Comparação das transformadas (desequilíbrio da 3ª fase)

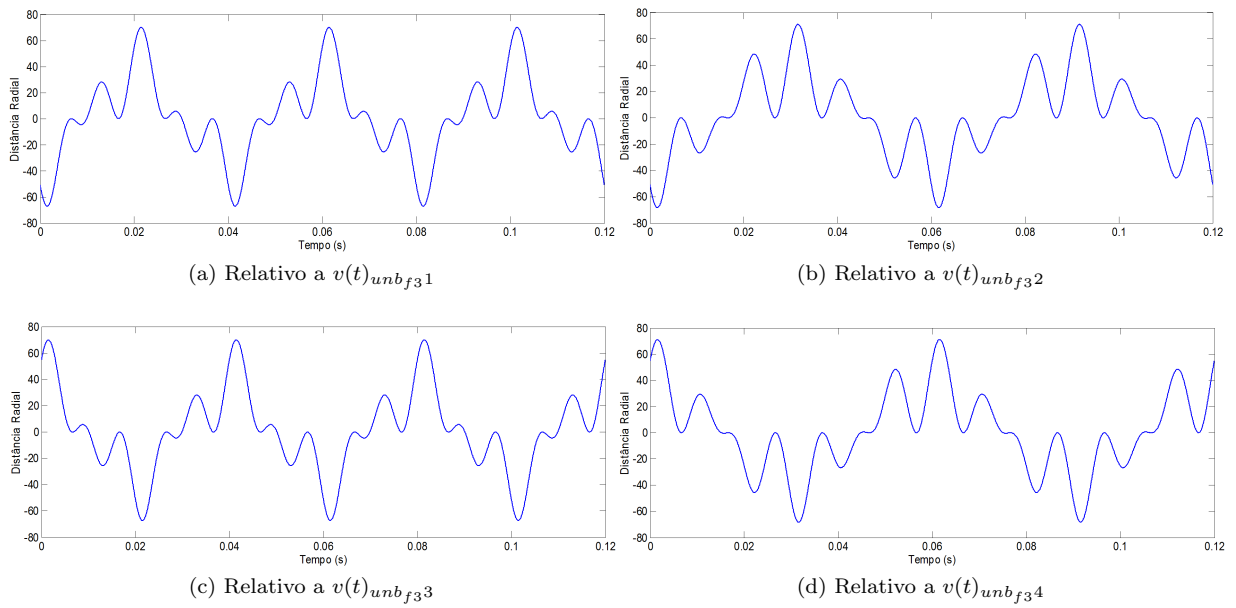


Figura 5.16: Distâncias radiais referentes a desequilíbrios na 3ª fase

Extraem-se então as seguintes *strings* e substituições:

$$strings \Rightarrow \begin{cases} vza \\ kzabzxe \\ kzabzxe \\ vza \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} k = (vx)^+ \\ v = (zabzxed)^+ \\ x = (cd)^+ \\ z = (cb)^+ \end{cases}$$

Aplicando nas *strings* obtidas as substituições:

$$((cb)^+ab(cb)^+(cd)^+ed)^+(cb)^+a + (((cb)^+ab(cb)^+(cd)^+ed)^+(cd)^+)^+(cb)^+ab(cb)^+(cd)^+e$$

Pode resumir-se a expressão, obtendo a seguinte expressão regular (gramática): $((cb)^+ab(cb)^+(cd)^+ed)^+ + (((cb)^+ab(cb)^+(cd)^+ed)^+(cd)^+)^+$.

5.2 Reorganização do alfabeto

Analisando as expressões regulares obtidas pelo método de inferência, verifica-se que, para algumas perturbações, o alfabeto é mais adequado do que para outras. Por exemplo, na situação de uma interrupção, verifica-se que o sinal composto da distância vai diminuir o seu valor, até atingir um ponto mínimo, onde se encontra o nível f . Assim, a expressão regular $cdef$ apresenta-se bastante simples correspondendo a um tempo de computação curto aquando do processo de reconhecimento. No entanto, na ocorrência de um desequilíbrio de tensão, nota-se a maior complexidade da expressão regular, tornando-se mais difícil de implementar e mais falível perante erros que os dados reais possam introduzir.

Por forma a obter expressões regulares menos complexas considerar-se-á uma redefinição do alfabeto usado. Numa primeira etapa, introduziram-se dois novos símbolos " u, l " originando um novo alfabeto terminal, $\Sigma_{T_2} = \{a, b, c, d, e, f, u, l\}$. Estes dois novos símbolos, referem-se a:

- A situação em que a distância radial efectua uma "subida", entende-se a passagem pelos níveis da seguinte forma, em notação de expressões regulares: $cb(ab)?c$, é substituída por u .
- A situação em que a distância radial efectua uma "descida", entende-se a passagem pelo níveis da seguinte forma, em notação de expressões regulares: $cd(ed)?c$, é substituída por l .

Com este novo alfabeto e após o processo de inferência gramatical foram obtidas as seguintes novas expressões regulares para cada tipo de defeito.

- Distorção Harmónica

$$\begin{aligned} - \quad strings &\Rightarrow \begin{cases} zb \\ zb \\ zb \\ zb \end{cases} & \text{substituições} &\Rightarrow \{z = (ul)^+\} \\ & & \text{substituindo} &\Rightarrow (ul)^+b & \text{gramática} &\Rightarrow (ul)^+ \end{aligned}$$

- Flutuações de Tensão

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} zba \\ zude \\ zude \\ zba \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{z = (ul)^+\}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (ul)^+ba + (ul)^+ude \quad \text{gramática} \Rightarrow (ul)^+$$

- Interrupção

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} cdef \\ cdef \\ cdef \\ cdef \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \emptyset$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow cdef \quad \text{gramática} \Rightarrow cdef$$

- Cava de Tensão

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} z \\ z \\ z \\ zc \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{z = l\}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (l)^+ \quad \text{gramática} \Rightarrow l$$

- Sobreensão

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} z \\ z \\ z \\ z \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{z = u\}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (u)^+ \quad \text{gramática} \Rightarrow u$$

- Desequilíbrio de tensão (1ª fase)

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} vz \\ v \\ v \\ vz \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} v = (zx)^+ \\ x = l^+ \\ z = u^+ \end{cases}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (u^+l^+)^+u^+ + (u^+l^+)^+ \quad \text{gramática} \Rightarrow (u^+l^+)^+$$

- Desequilíbrio de tensão (2ª fase)

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} vzba \\ vde \\ vzde \\ vzba \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} v = (zx)^+ \\ x = l^+ \\ z = u^+ \end{cases}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (u^+l^+)^+u^+ba + (u^+l^+)^+de + (u^+l^+)^+u^+de \quad \text{gramática} \Rightarrow (u^+l^+)^+$$

- Desequilíbrio de tensão (3ª fase)

$$\begin{aligned}
 \text{—} \quad strings &\Rightarrow \begin{cases} vzba \\ vde \\ vde \\ vzba \end{cases} & \text{substituições} &\Rightarrow \begin{cases} v = (zx)^+ \\ x = l^+ \\ z = u^+ \end{cases} \\
 & & \text{substituindo} &\Rightarrow (u^+l^+)^+u^+ba + (u^+l^+)^+de & \text{gramática} &\Rightarrow (u^+l^+)^+
 \end{aligned}$$

Com esta nova definição do alfabeto, de uma forma geral, as gramáticas das perturbações ficam mais simples e fáceis de entender, nomeadamente nos casos dos desequilíbrios de tensão, que, resumidamente, são um conjunto de uma ou mais “subidas” seguidas de uma ou mais “descidas”, isto de forma repetida. Existe contudo uma desvantagem associada a este novo alfabeto: não é possível distinguir entre distorção harmónica e flutuação de tensão. Ao verificar-se a representação do sinal que é inferido, repara-se que as diferenças entre estas duas perturbações são duas:

- Frequência diferente, que não é mensurável, porque, como foi referido atrás, a informação temporal é perdida.
- Os valores do sinal são razoavelmente diferentes no caso da existência de harmónicas, pois, de uma forma geral, estas têm amplitude baixa, enquanto as flutuações têm valores mais altos.

Perante esta análise considerou-se um novo alfabeto terminal, introduzindo os símbolos “ u, h, l, n ”, ou seja, $\Sigma_{T_3} = \{a, b, c, d, e, f, u, h, l, n\}$. Estes novos símbolos codificam as seguintes situações:

- “Subida”, que se entende pela expressão cbc , correspondendo a u ;
- “Grande subida”, que se entende pela expressão $cbabc$, correspondendo a h ;
- “Descida”, que se entende pela expressão cdc , correspondendo a l ;
- “Grande descida”, que se entende pela expressão $cdedc$, correspondendo a n .

Resultam desta alteração as seguintes novas expressões regulares (novas gramáticas):

- Distorção Harmónica

$$\begin{aligned}
 \text{—} \quad strings &\Rightarrow \begin{cases} zb \\ zb \\ zb \\ zb \end{cases} & \text{substituições} &\Rightarrow \{z = (ul)^+\} \\
 & & \text{substituindo} &\Rightarrow (ul)^+b & \text{gramática} &\Rightarrow (ul)^+
 \end{aligned}$$

- Flutuações de Tensão

$$\begin{aligned}
 \text{—} \quad strings &\Rightarrow \begin{cases} zba \\ zhde \\ zhde \\ zba \end{cases} & \text{substituições} &\Rightarrow \{z = (hn)^+\} \\
 & & \text{substituindo} &\Rightarrow (hn)^+ba + (hn)^+hde & \text{gramática} &\Rightarrow (hn)^+
 \end{aligned}$$

- Interrupção

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} cdef \\ cdef \\ cdef \\ cdef \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \emptyset$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow cdef \quad \text{gramática} \Rightarrow cdef$$

- Cava de Tensão

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} z \\ z \\ z \\ z \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{z = n\}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (n)^+ \quad \text{gramática} \Rightarrow n$$

- Sobreensão

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} z \\ z \\ z \\ z \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \{z = h\}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (h)^+ \quad \text{gramática} \Rightarrow h$$

- Desequilíbrio de tensão (1ª fase)

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} vz \\ kuzulx \\ v \\ kuz \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} k = uzulxl \\ v = zx \\ x = n \\ z = h \end{cases}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (h^+n^+)^+h^+ + (uh^+uln^+l)^+uh^+uln^+ + (uh^+uln^+l)^+uh^+$$

$$\text{gramática} \Rightarrow (h^+n^+)^+ + (uh^+uln^+l)^+$$

- Desequilíbrio de tensão (2ª fase)

$$- \quad strings \Rightarrow \begin{cases} zuba \\ xuhulde \\ zuhulde \\ xuba \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} x = uhulnl \\ z = uhunl \end{cases}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (uhunl)^+uba + (uhulnl)^+uhulde + (uhunl)^+uhude + (uhulnl)^+uba$$

$$\text{gramática} \Rightarrow (uhunl)^+ + (uhulnl)^+$$

- Desequilíbrio de tensão (3ª fase)

$$strings \Rightarrow \begin{cases} zuba \\ xuhulde \\ zuhulde \\ xuba \end{cases} \quad \text{substituições} \Rightarrow \begin{cases} x = zl \\ z = uhuln \end{cases}$$

$$\text{substituindo} \Rightarrow (uhuln)^+uba + ((uhuln)^+l)^+uhulde + (uhuln)^+uhulde + ((uhuln)^+l)^+uba$$

$$\text{gramática} \Rightarrow (uhuln)^+ + ((uhuln)^+l)^+$$

O alfabeto proposto nesta fase resolve a situação descrita anteriormente sobre a detecção de harmónicas ou de flutuações, pois assim, as suas gramáticas diferem.

Verifica-se que, no desequilíbrio das fases, obtêm-se gramáticas ligeiramente diferentes e um pouco mais complexas que na primeira alteração. Mantêm-se visíveis as “subidas” e “descidas” que o caracterizam, mas com algumas nuances, tanto de valor da “subida/descida”, como de repetições.

Na tabela 5.1, apresenta-se um resumo das expressões regulares obtidas em todas as perturbações, utilizando os três alfabetos estudados. O uso das chavetas, tem neste caso o mesmo significado que a adição das expressões, devendo-se simplesmente à melhor formatação da tabela.

Tabela 5.1: Resumo das expressões regulares inferidas, baseadas nos diferentes alfabetos

Perturbação	Alfabeto Σ_{T_1}	Alfabeto Σ_{T_2}	Alfabeto Σ_{T_3}
Distorção harmónica	$(cbcd)^+$	$(ul)^+$	$(ul)^+$
Flutuações de tensão	$(cbabcbded)^+$	$(ul)^+$	$(hn)^+$
Interrupção	$cdef$	$cdef$	$cdef$
Cava de tensão	$cded$	l	n
Sobretensão	$cbab$	u	h
Desequilíbrio de tensão (fase 1)	$\begin{cases} ((cbab)^+(cded)^+) \\ (cb(cbab)^+cbcd(cded)^+cd) \end{cases}$	$(u^+l^+)^+$	$(h^+n^+)^+ + (uh^+uln^+l)^+$
Desequilíbrio de tensão (fase 2)	$((cb)^+ab(cb)^+(cd)^+ed(cd)^+)$	$(u^+l^+)^+$	$(uhunl)^+ + (uhulnl)^+$
Desequilíbrio de tensão (fase 3)	$\begin{cases} ((cb)^+ab(cb)^+(cd)^+ed) \\ (((cb)^+ab(cb)^+(cd)^+ed)^+(cd)^+) \end{cases}$	$(u^+l^+)^+$	$(uhunl)^+ + (uhuln)^+l^+$

Analisando as gramáticas obtidas das simulações, confirmam-se algumas vantagens em usar a primeira revisão do alfabeto numas situações e de usar a segunda revisão noutras. Por exemplo, o uso de apenas “ u, l ” é bastante interessante nas situações de desequilíbrio, mas, a nível de harmónicas, flutuações, cava e sobretensão, é bastante genérico e pouco preciso; nestas situações, o uso de “ u, h, l, n ” parece mais apropriado.

Desta forma optou-se por um uso misto destes dois alfabetos. Inicialmente, é usado o alfabeto Σ_{T_2} . Na situação em que se recolhe uma gramática de que não é possível retirar a informação completa da perturbação, aplica-se o alfabeto Σ_{T_3} .

5.3 Análise da qualidade de energia

5.3.1 Algoritmo para identificação de uma perturbação

Do que foi exposto anteriormente tem-se que a cada tipo de perturbação se encontra uma gramática que caracteriza uma dada linguagem. A ideia básica para identificar uma perturbação nova é a seguinte: assumindo que cada tipo de perturbação, independentemente da sua amplitude ou duração, está associada a uma mesma linguagem, o algoritmo de identificação apenas terá de identificar essa linguagem.

Nos capítulos anteriores foram estabelecidas as várias gramáticas que especificam as várias linguagens associadas a cada tipo de perturbação. Estas foram inferidas a partir de um conjunto de exemplos de treino obtidos por simulação de diferentes ocorrências do mesmo tipo de perturbação.

Possuindo esta biblioteca de gramáticas, perante um dado sinal (perturbado ou não) o algoritmo deverá verificar qual das gramáticas poderá gerar o referido sinal, identificando desta forma a perturbação. Caso o sinal não pertença a nenhuma das linguagens estabelecidas, está-se perante uma perturbação não aprendida. Outra forma de identificar, será estabelecer a gramática do sinal a analisar e, compará-la com a biblioteca de gramáticas previamente estabelecidas, efectuando desta forma a detecção da perturbação.

Como se concluiu no final de 5.2 será muito interessante considerar dois alfabetos distintos em função do tipo de perturbação que se pretende detectar. Desta forma, o algoritmo de identificação de perturbações irá efectuar uma análise utilizando primeiro as gramáticas que utilizam o alfabeto Σ_{T_2} (mais simples). No caso da identificação se revelar inconclusiva, serão então consideradas as gramáticas que utilizam o alfabeto Σ_{T_3} (mais complexo, mas sem ambiguidades de detecção).

Tome-se como exemplo a ocorrência de flutuações de tensão:

- Obtém-se a gramática desta perturbação, considerando o alfabeto Σ_{T_2} . A expressão regular obtida foi $(ul)^+$;
- Visto que esta gramática é homóloga à existência de harmónicas, não é possível decidir;
- Considera-se agora o alfabeto Σ_{T_3} . A expressão regular (gramática) obtida foi $(hn)^+$, que é específico das flutuações de tensão.

Na figura 5.17, apresenta-se o fluxograma do algoritmo utilizado para identificar as perturbações (método de análise da qualidade de energia).

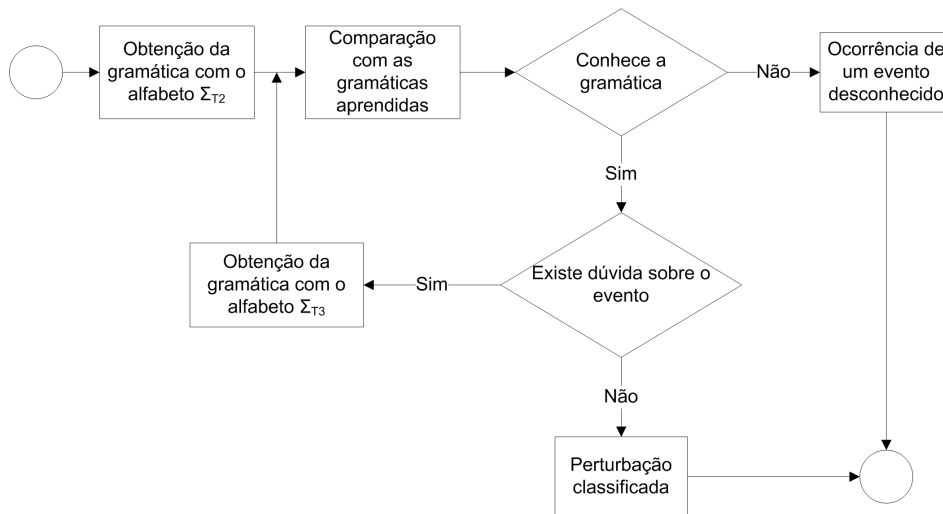


Figura 5.17: Algoritmo de identificação de perturbações

Idealmente, o sistema de verificação das gramáticas é implementado usando uma máquina de estados não-determinística. A cada gramática corresponde uma máquina de estado própria, com os símbolos a serem “corridos” pela máquina, até que esta fosse concluída, situação que permite a identificação da falha. Devido à complexidade da criação de máquinas de estados não-determinísticas, nesta dissertação aplica-se todo o método de inferência, procedendo-se, no final à comparação entre a gramática recolhida e as gramáticas aprendidas.

Apresentam-se dois exemplos simulados para a detecção de perturbações. Escolheu-se a ocorrência de um desequilíbrio de tensões e de uma cava. Realça-se o facto de ambos terem sido simulados com características diferentes daquelas usadas na aprendizagem, a fim de verificar a competência das gramáticas aprendidas e a sua capacidade de generalização.

A simulação de um desequilíbrio, tem as seguintes características:

$$\begin{aligned} v(t)_{Unbf1_{teste}} &= 230 * \sqrt{2} * \sin(\omega t) \\ v(t)_{Unbf2_{teste}} &= 230 * \sqrt{2} * \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \\ v(t)_{Unbf3_{teste}} &= (230 + 50 * \cos(\frac{\omega}{5}t)) * \sqrt{2} * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned}$$

Na figura 5.18, apresentam-se a forma de onda e, na figura 5.19, a respectiva transformada de Concordia e diferença radial.

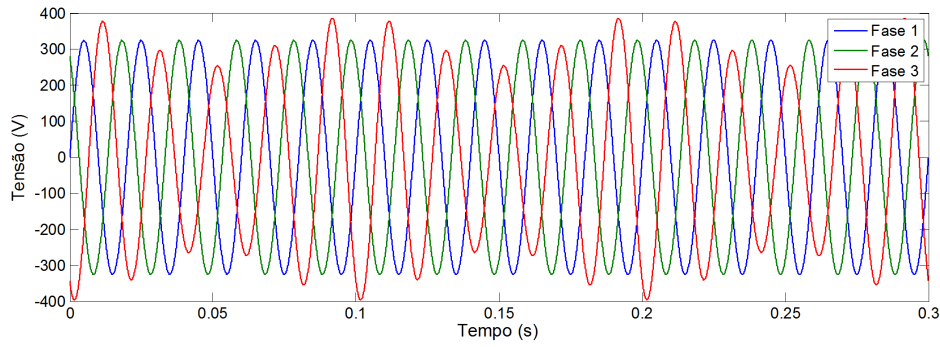


Figura 5.18: Simulação da ocorrência de desequilíbrio de tensões

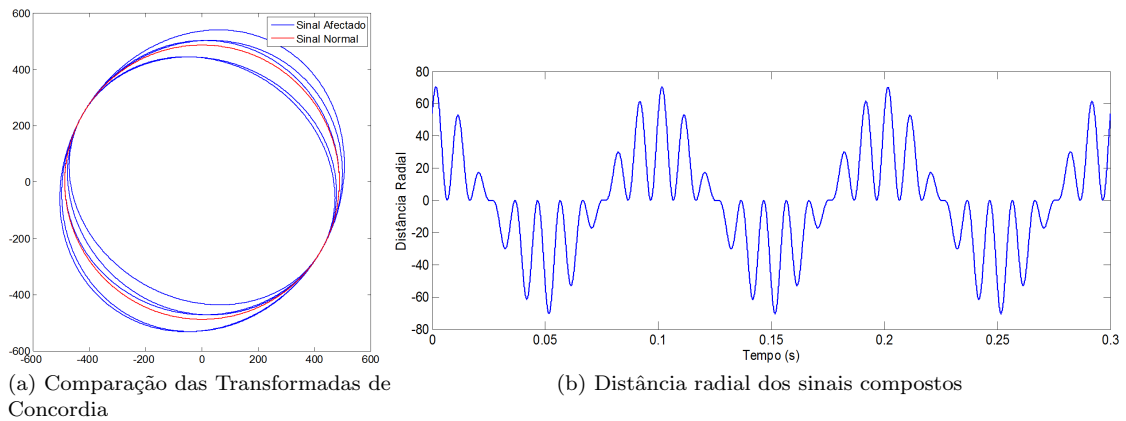


Figura 5.19: Comparação da transformação de desequilíbrio de tensões

Aplicando-se todo o procedimento descrito no capítulo 4 obtiveram-se os seguintes resultados.

- Utiliza-se primeiro o alfabeto Σ_{T_2}
- Retira-se a *string*: *vzba*

- As respectivas substituições:
$$\begin{cases} v = zx \\ x = l \\ z = u \end{cases}$$
- Aplicando as substituições, obtém-se $(u^+l^+)^+u^+ba$. Retira-se, assim, a expressão regular $(u^+l^+)^+$.

Verifica-se que a gramática obtida é igual à gramática que foi aprendida para esta perturbação.

Simulando uma cava de tensão, em que o valor eficaz da tensão desce até 180 V, e usando um ritmo de descida e subida diferente do usado na aprendizagem, produziu-se a perturbação apresentada na figura 5.20. A transformação e comparação relativas à perturbação apresentam-se na figura 5.21.

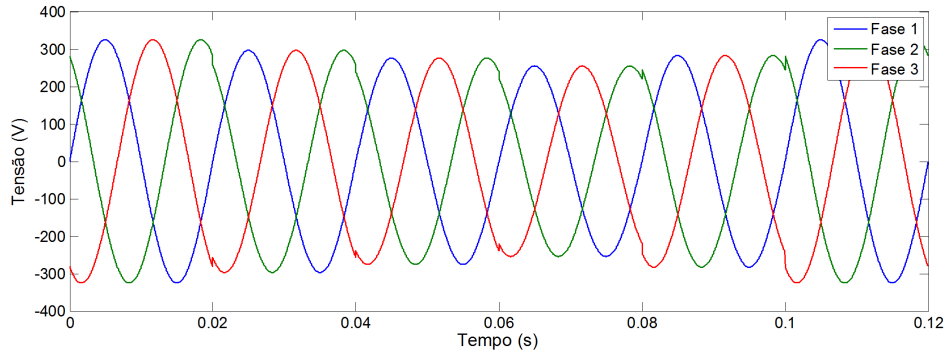


Figura 5.20: Simulação da ocorrência de uma cava

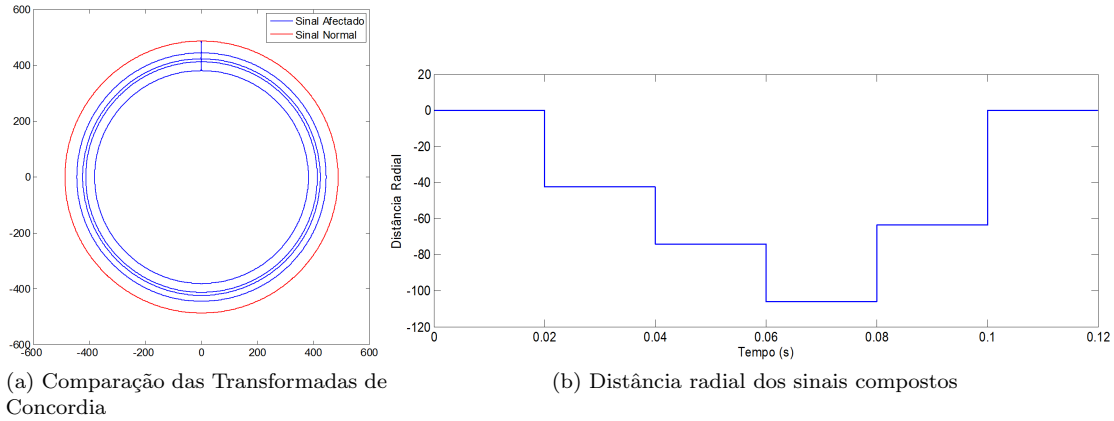


Figura 5.21: Comparação da transformação da cava

Aplicando novamente o procedimento anterior, obtém-se:

- Utiliza-se o primeiro o alfabeto Σ_{T_2}
- Retira-se a *string*: l
- As respectivas substituições: $\{\emptyset\}$
- Não havendo substituições, verifica-se que a expressão representante da gramática é l , visto que esta gramática não é específica, porque apenas indica um descida do valor eficaz, sem se saber se está realmente dentro dos valores estabelecidos para a cava. Desta forma, executa-se a análise com recurso ao alfabeto Σ_{T_3} .

- Retira-se a *string*: n , mais uma vez não foram feitas substituições; sendo possível certificar que a ocorrência é realmente uma cava de tensão e não apenas, uma descida do valor eficaz ainda dentro dos valores estipulados como aceitáveis.

Conclui-se que, nos ensaios efectuados, em que foram gerados sinais de perturbação eléctrica com características diferentes dos exemplos de treino, obtiveram-se resultados positivos quanto à detecção e classificação na sua categoria de perturbação.

5.3.2 Aplicação a resultados experimentais

Para testar o método de análise da qualidade de energia, usando dados reais da rede, utilizou-se um autotransformador ligado a uma carga trifásica, ligando-se um osciloscópio com capacidade de aquisição, tal como se apresenta na figura 5.22. As características técnicas dos equipamentos:

- Autotransformador trifásico de 5 kVA;
- Osciloscópio TEKTRONIX TDS 3014B de 4 canais;
- Resistência trifásica de 3,3 kW.

A partir dos dados adquiridos pelo osciloscópio, é executado todo o método usado anteriormente, nas simulações; é criado um sinal trifásico saudável, aplicada a Transformada de Concordia aos dois sinais trifásicos, comparada a distância radial entre os dois, o sinal resultante é filtrado por um filtro de média e aplicado o alfabeto Σ_{T_2} . Em seguida, executa-se a inferência a partir das palavras obtidas dos resultados experimentais, derivando numa expressão regular, que é comparada com as expressões obtidas na fase de aprendizagem; se for necessário é utilizado o alfabeto Σ_{T_3} , inferindo-se novas gramáticas a partir da amostra.

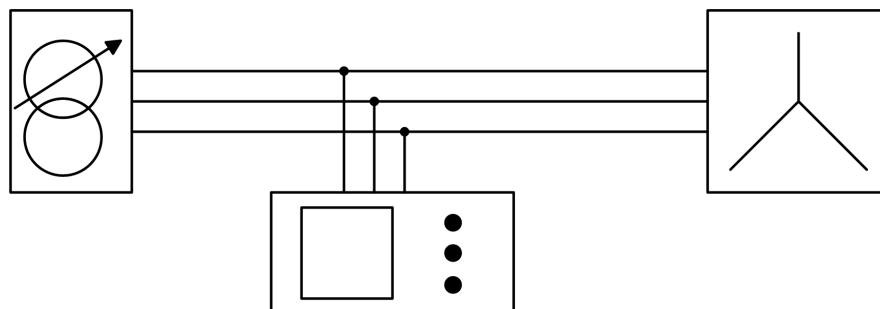


Figura 5.22: Montagem usada na aquisição de dados reais

5.3.2.1 Interrupção

Para ilustrar esta perturbação, apresentam-se duas aquisições distintas. A primeira interrupção, apresenta-se na figura 5.23, e as respectivas transformada e distância radial, na figura 5.24.

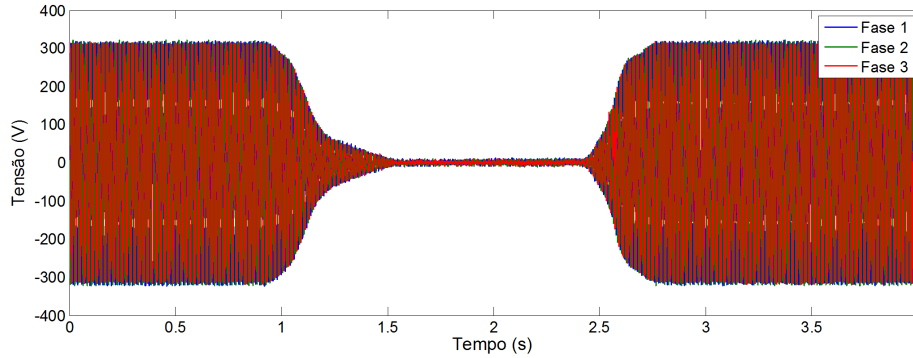


Figura 5.23: Representação gráfica dos dados adquiridos a partir da interrupção

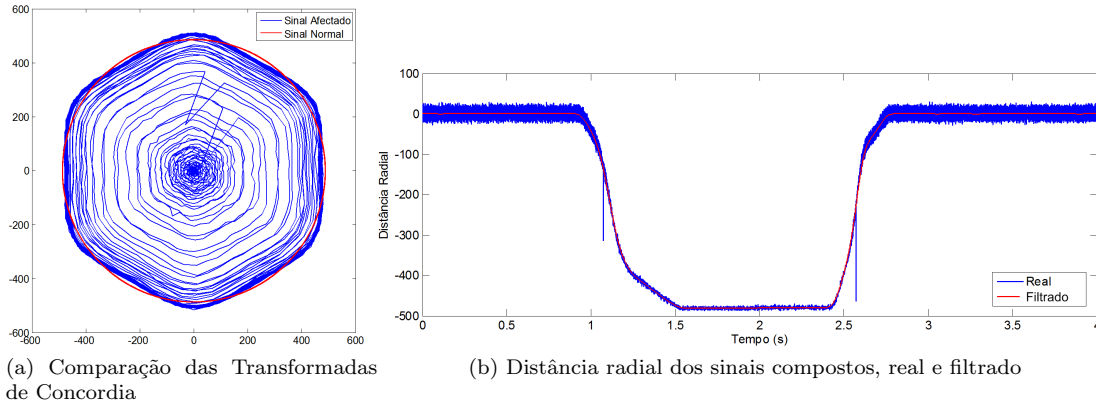


Figura 5.24: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da interrupção

Obtém-se a *string cdefedc*. Na aprendizagem efectuada no capítulo 4, conclui-se que a gramática que caracteriza uma interrupção tem como expressão regular *cdef*. Desta forma, é reconhecida a existência de uma perturbação no sinal. Eventualmente, a situação normaliza. No entanto, a interrupção aconteceu e foi detectada.

Uma segunda interrupção é apresentada na figura 5.25 e, na figura 5.26, a sua transformada e respectiva comparação.

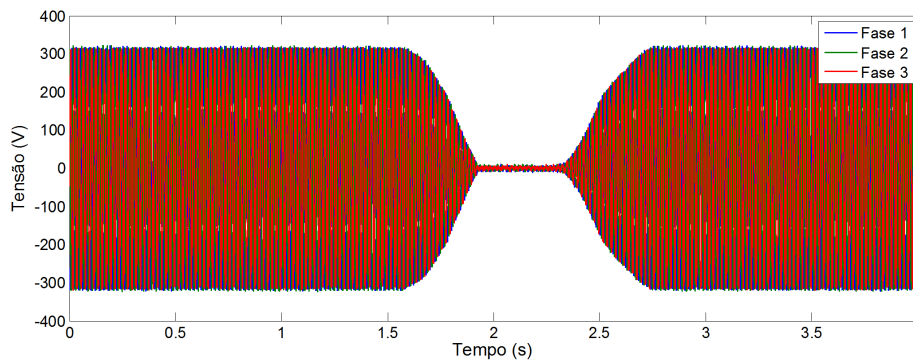


Figura 5.25: Representação gráfica dos dados adquiridos a partir da interrupção

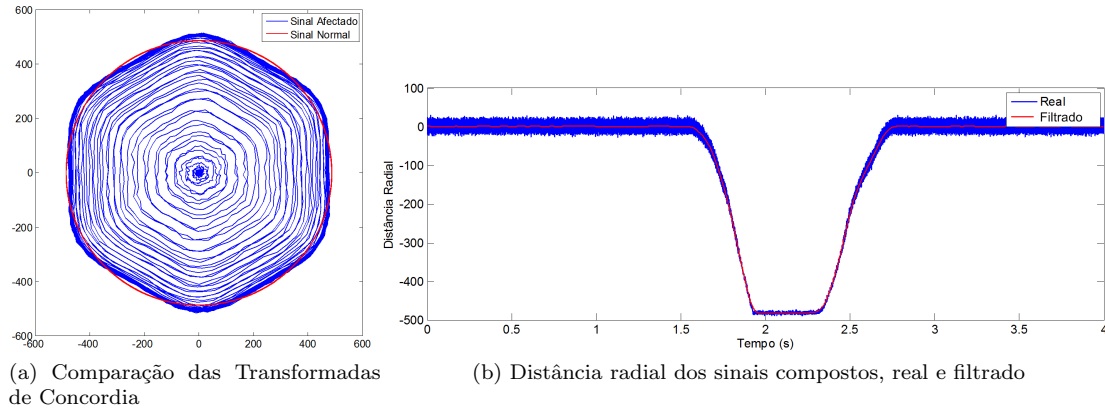


Figura 5.26: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da interrupção

Neste caso, a palavra recolhida destes dados é a mesma que a anterior, ou seja *cdefedc*, podendo concluir-se tal como anteriormente, que a perturbação é bem identificada.

5.3.2.2 Cava de Tensão

Tal como no caso anterior, apresentam-se duas recolhas de dados referentes à existência de uma cava de tensão. Na figura 5.27, são apresentados os dados experimentais referente à primeira situação e, na figura 5.28, a Transformada de Concordia e respectiva comparação.

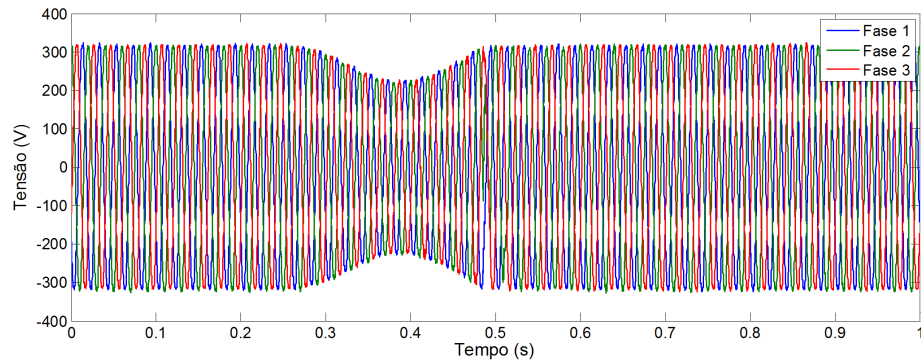


Figura 5.27: Representação gráfica dos dados adquiridos a partir da cava

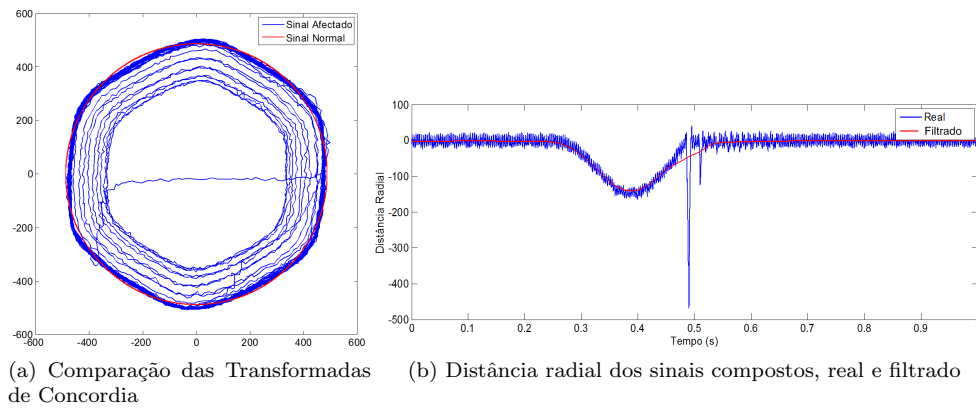


Figura 5.28: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da cava

Utilizando primeiro o alfabeto Σ_{T_2} para inferir a gramática, apenas se retira a palavra *l*. Uma vez que apenas se verifica uma descida do valor, mas não garante a ocorrência de uma perturbação, é usado

o alfabeto Σ_{T_3} , resultando na palavra n , que é coerente com a gramática obtida para a linguagem associada à presença de cavas de tensão.

Os dados referentes à segunda experiência relativa a uma cava de tensão são apresentados na figura 5.29 e a sua relação com um sinal não perturbado na figura 5.30.

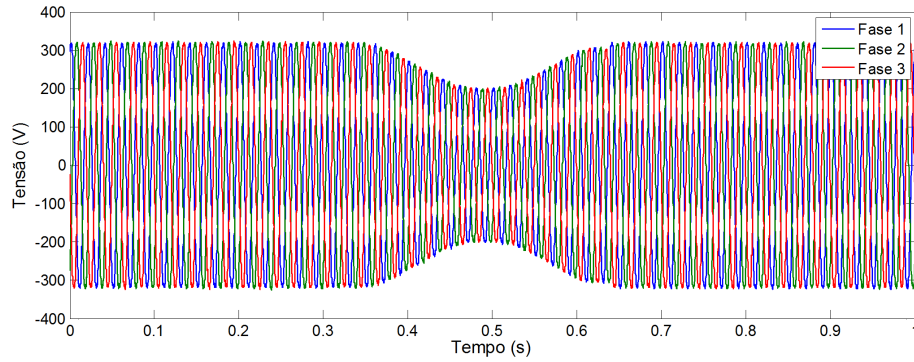
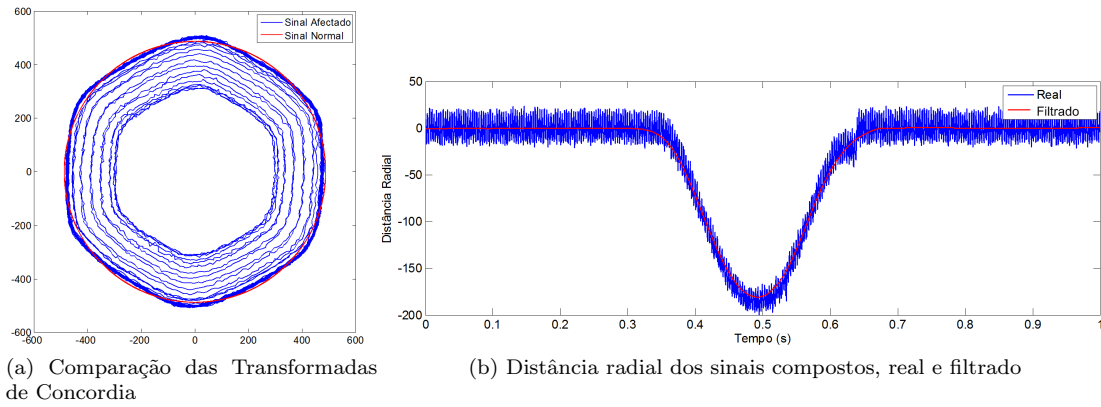


Figura 5.29: Representação gráfica dos dados obtidos da cava



(a) Comparação das Transformadas de Concordia

(b) Distância radial dos sinais compostos, real e filtrado

Figura 5.30: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da cava

Obteve-se a mesma expressão regular que no caso anterior, encaixando-se no padrão obtido pelos exemplos de aprendizagem.

5.3.2.3 Sobretenção

A figura 5.31 apresenta os dados reais recolhidos aquando a ocorrência de uma sobretensão, verifica-se ainda na figura 5.32 a resultante comparação das transformações e respectiva distância radial.

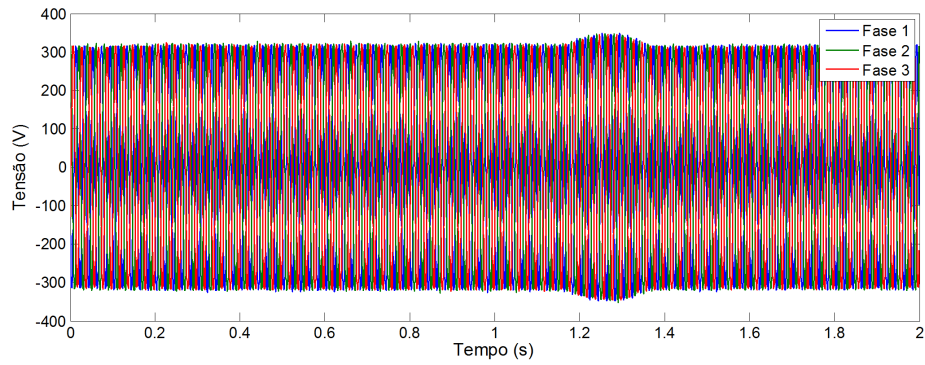


Figura 5.31: Representação gráfica dos dados obtidos de uma sobretensão

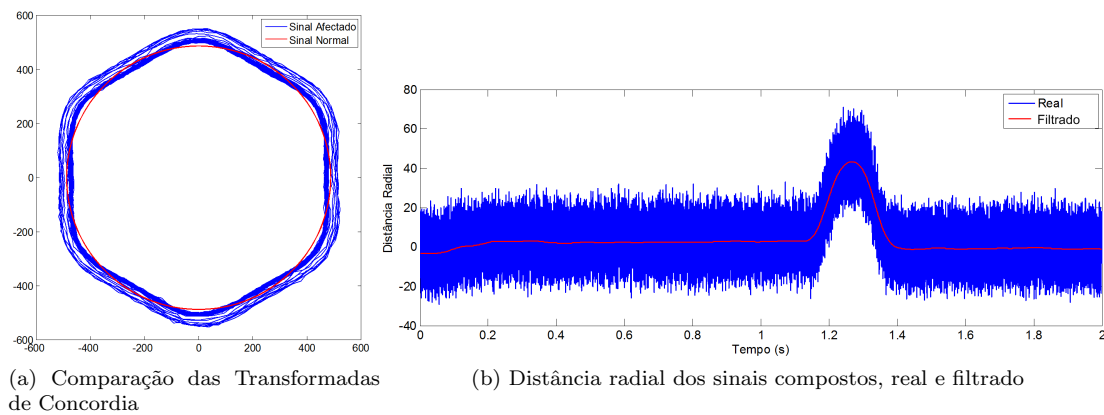


Figura 5.32: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da sobretensão

A expressão regular que caracteriza esta perturbação é u . Verifica-se que mesmo com a utilização do alfabeto Σ_{T_3} a expressão regular obtida não coincide com nenhuma das gramáticas aprendidas. Tal deve-se ao facto de que a pequena alteração no sinal não é suficiente para ser considerada uma perturbação na qualidade da energia, de acordo com o estabelecido pela norma [16].

No segundo ensaio, foram recolhidos os dados apresentados na figura 5.33; sendo a sua relação com a situação não perturbada apresentada na figura 5.34.

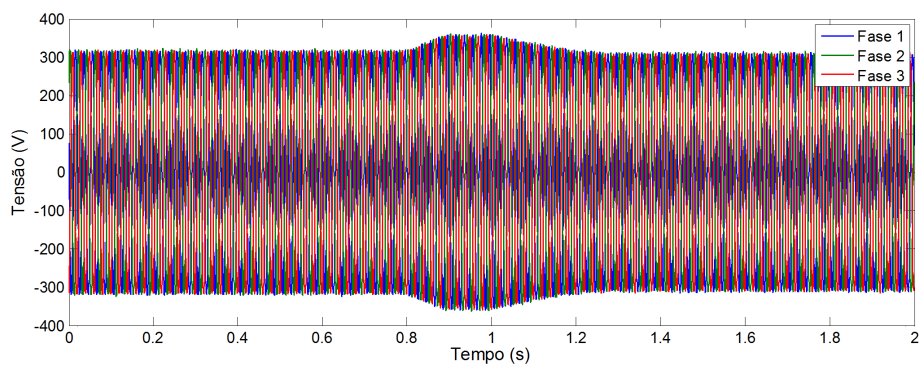


Figura 5.33: Representação gráfica dos dados adquiridos a partir de uma sobretensão

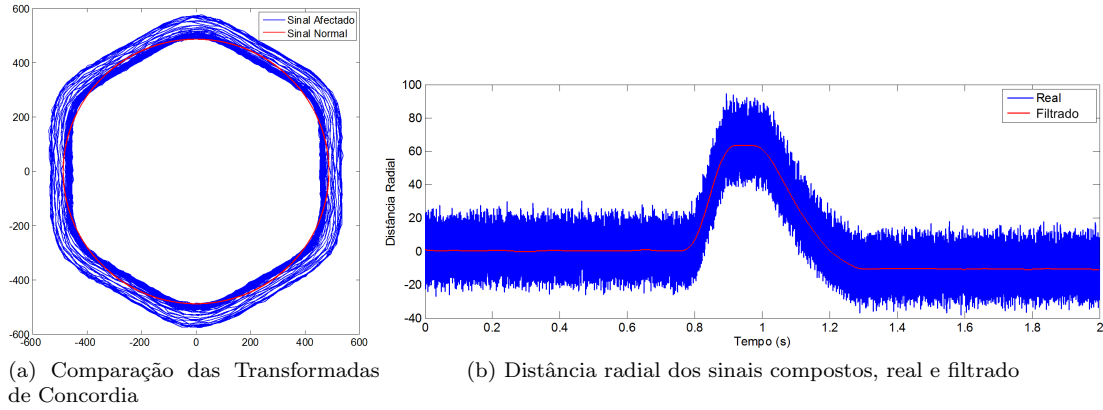


Figura 5.34: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir da sobretensão

A expressão regular resultante do processo de inferência é hd . Esta é exactamente a mesma expressão regular representante da gramática inferida para sobretensões. Após a ocorrência, verifica-se uma descida para o nível d , que se deve apenas a um erro de sensibilidade no momento do teste. No entanto, não afecta a conclusão, visto que a perturbação é detectada apenas com o símbolo h .

5.3.2.4 Flutuações de Tensão

Foram obtidas duas situações em que existem flutuações de tensão nas três fases. Apresenta-se a primeira nas figuras 5.35 e 5.36.

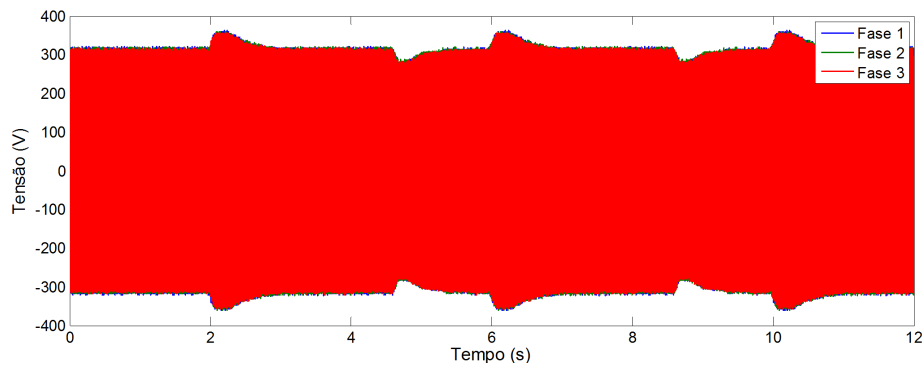


Figura 5.35: Representação gráfica dos dados adquiridos a partir de flutuações

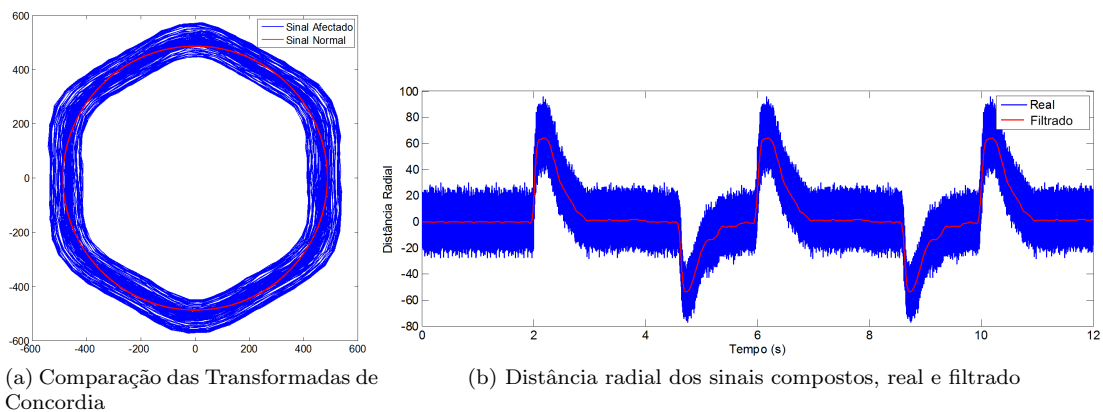


Figura 5.36: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir de flutuações

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Esta ocorrência tem como respectiva palavra zh , em que $z = (hn)^+$. Substituindo, obtém-se $(hn)^+h$.

A expressão regular que rege esta sequência de símbolos é $(hn)^+$, coerente com a expressão regular inferida para as flutuações, permitindo identificar a ocorrência de uma flutuação.

Na figura 5.37 apresenta-se a segunda situação correspondente a flutuação de tensão.

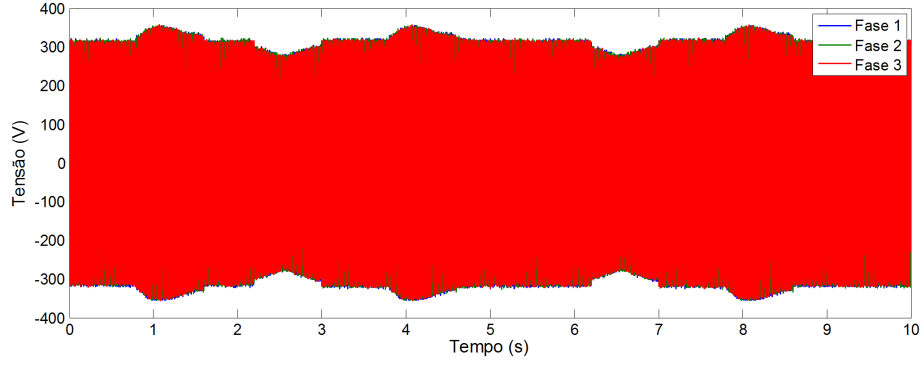


Figura 5.37: Representação gráfica dos dados adquiridos a partir de flutuações

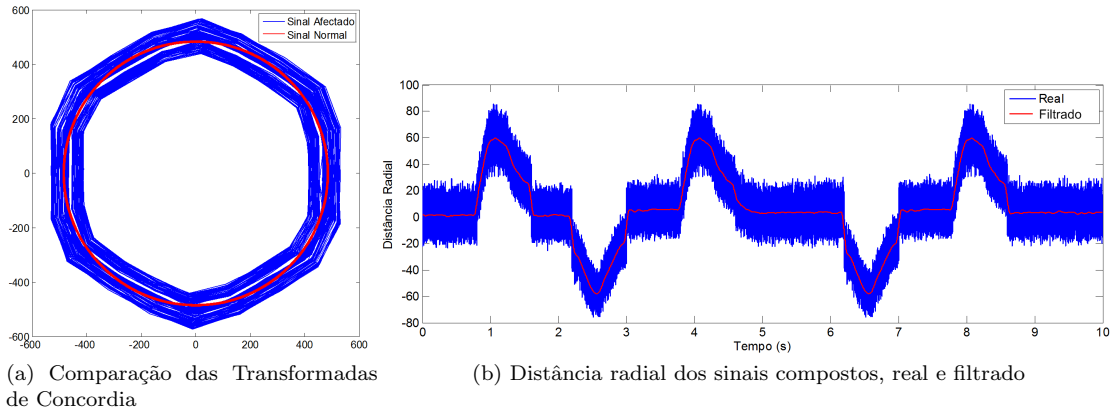


Figura 5.38: Comparação dos dados transformados adquiridos a partir de flutuações

Obtém-se os mesmos resultados que na primeira situação de flutuação de tensão, permitindo recolher as mesmas conclusões.

Capítulo 6

Conclusões

A execução deste trabalho teve como objectivo a aplicação de linguagens formais na detecção e classificação automática de eventos em qualidade de energia. O constante crescimento da utilização de sistemas electrónicos, cada vez mais sensíveis às variações da energia fornecida pela rede eléctrica, reforça a necessidade de monitorização da rede.

Criou-se uma ferramenta de detecção automática de perturbações numa rede trifásica, ferramenta essa que usa vários métodos e formalismos menos comuns em relação à bibliografia existente na área.

O uso da Transformada de Concordia revela-se bastante interessante na medida em que, a sua utilização simplifica a análise do sinal em comparação com uma análise individual de cada fase. O uso de linguagens formais já empregue em outras áreas ([23, 21]), encoraja a sua utilização, nomeadamente na análise de perturbações da rede; no decorrer da investigação do alfabeto a usar, percebeu-se da grande influência deste, afectando muito a capacidade de simplificação e detecção do método, assim, o estudo de vários alfabetos resultou num conjunto de alfabetos terminais $(\Sigma_{T_1}, \Sigma_{T_2}, \Sigma_{T_3})$, que demonstraram ser apropriados para o caso em estudo.

O método pressupõe uma aprendizagem inicial, e é efectuando essa aprendizagem que o algoritmo de inferência vai ser capaz de retirar as gramáticas relacionadas com os fenómenos ocorridos. Assim o conjunto de simulações de perturbações tem de ter qualidade suficiente, para que as gramáticas aprendidas sejam válidas num contexto real (dados reais); desta forma, os exemplos de aprendizagem foram concebidos para retratar a realidade. Foi possível confirmar que as gramáticas aprendidas, obtiveram sucesso na detecção das perturbações existentes em dados reais, onde a identificação de novos fenómenos, é efectuada através de uma comparação entre a base de dados existente (criada através da aprendizagem) e a gramática inferida sobre os novos dados, sendo um processo simples a nível computacional.

O presente trabalho inferiu gramáticas para vários tipos de perturbações, usando-as no reconhecimento em dados reais, onde foram identificadas com sucesso perturbações do mesmo tipo mas com características diferentes; concluindo-se desta forma que, a utilização de linguagens formais apresenta resultados interessantes e promissores nesta área.

Como trabalho futuro, sugere-se o seguinte:

- Uso e comparação de resultados de, outros algoritmos de inferência para o cálculo das gramáticas das perturbações;
- Estudo de técnicas em que seja possível envolver o conhecimento temporal do sinal nas gramáticas;
- Desenvolvimento de alfabetos e gramáticas para a detecção de outros eventos não estudados (impulso oscilatório, *notching*, etc.);

Publicações

No decorrer do desenvolvimento desta dissertação, foi elaborado, publicado e apresentado uma publicação científica, intitulada “*Power Quality Disturbances Recognition Based on Grammatical Inference*”, Tiago Fonseca e João F. Martins, apresentada na conferência DoCEIS 2011, publicada em “Technological Innovation for Sustainability, Second IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, DoCEIS 2011, Costa de Caparica, Portugal, February 21-23, 2011. Proceedings”.

Bibliografia

- [1] I. D. E. E. U. d. C. EDP, *Manual da qualidade da energia eléctrica*. EDP, Dezembro 2005.
- [2] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen, and I. Y. H. Gu, “Expert system for voltage dip classification and analysis,” in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 671–676, 2001.
- [3] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen, and I. Y. H. Gu, “Automatic classification of power system events using rms voltage measurements,” in *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 824–829, 2002.
- [4] V. Matz, T. Radil, P. Ramos, and A. C. Serra, “Automated power quality monitoring system for on-line detection and classification of disturbances,” in *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pp. 1–6, IEEE, 2007.
- [5] P. M. Ramos, T. Radil, and A. C. Serra, “Detection and classification of transients and waveform distortions using an algorithm based on sine-fitting,” in *Proc IMEKO TC4 Symp., Florence, Italy*, vol. 1, pp. 323–328, 2008.
- [6] P. Handel, “Properties of the ieee-std-1057 four parameter sine wave fit algorithm,” tech. rep., IEEE, Dec 2000.
- [7] B. W. Suter, *Multirate and Wavelet Signal Processing (Wavelet Analysis and Its Applications)*. Academic Press, January 1998.
- [8] F. Jurado and J. R. Saenz, “Comparison between stft and wavelets for the analysis of power quality events,” *Electric Power Systems Research*, vol. 62, pp. 183–190, 2002.
- [9] P. K. Dash, B. K. Panigrahi, and G. Panda, “Power quality analysis using s-transform,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18(2), pp. 406–411, 2003.
- [10] O. Poisson, P. Rioual, and M. Meunier, “New signal processing tools applied to power quality analysis,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14(2), pp. 561–566, 1999.
- [11] H. He and J. A. Starzyk, “A self-organizing learning array system for power quality classification based on wavelet transform,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21(1), pp. 286–295, 2006.
- [12] T. Radil, F. M. Janeiro, P. M. Ramos, and A. C. Serra, “An efficient approach to detect and classify power quality disturbances,” *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 27, p. 5, 2008.
- [13] H. He, X. Shen, and J. A. Starzyk, “Power quality disturbances analysis based on edmra method,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 31, pp. 258–268, 2009.
- [14] G. Zwi-Lee, “Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 1560 – 1568, 2004.

- [15] S. Suja and J. Jerome, "Pattern recognition of power signal disturbances using s transform and tt transform," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, pp. 37–53, 2010.
- [16] "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, en50160," July 1995.
- [17] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*. MacGraw-Hill, second ed., 2002.
- [18] A. Kusko and M. T. Thompson, *Power Quality in Electrical Systems*. MacGraw-Hill, 2007.
- [19] E. F. Fuchs and M. A. S. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Elsevier Inc., 2008.
- [20] E. M. Gold, "Language identification in the limit," *Information and Control*, vol. 10, pp. 447–474, 1967.
- [21] J. F. A. Martins, *MODELIZAÇÃO E CONTROLO DE SISTEMAS ELECTROMECHANICOS POR INFERÊNCIA GRAMATICAL*. PhD thesis, UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA - INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, Julho 2002.
- [22] Y. N. Singh, *Mathematical foundation of computer science*. New age internacional publishers, 2005.
- [23] J. P. M. d. Sá, *Pattern Recognition, Concepts, Methods and Applications*. Springer, 2001.
- [24] L. Miclet, *Syntactic and structural pattern recognition - Theory and applications*, vol. 7, ch. 9 - Grammatical Inference, pp. 237–290. World Scientific, 1990.